

State-of-the-Art CO₂ en Mobiliteit

Input voor gezamenlijk
adviesproject van Raad V&W,
VROM-Raad en AER

Rapport

Delft, juli 2007

Opgesteld door: R.T.M (Richard) Smokers
L.C. (Eelco) den Boer
J.F. (Jasper) Faber



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

R.T.M (Richard) Smokers, L.C. (Eelco) den Boer, J.F. (Jasper) Faber
State-of-the-art CO₂ en Mobiliteit
Deel I - Kwantitatieve gegevens sector Verkeer en Vervoer
Deel II - Inzicht in oplossingsrichtingen en aangrijpingspunten
Delft, CE, 2007

Goederenvervoer / Geschiedenis / Prognoses / Kooldioxide / Emissies / Energie-
gebruik / Energiebesparing / CO₂-reductie / Beleidsinstrumenten / Wegverkeer /
Zeevaart / Luchtverkeer

Publicatienummer: 06.4392.60

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

Opdrachtgever: Raad voor Verkeer & Waterstaat
Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Richard
Smokers.

© copyright, CE, Delft

CE

Oplossingen voor milieu, economie en technologie

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

De meest actuele informatie van CE is te vinden op de website: www.ce.nl.

Dit rapport is gedrukt op 100% kringlooppapier.

Inhoud

Samenvatting	1
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doelstelling en projectkader	7
1.3 Afbakening en uitgangspunten	8
1.4 Opbouw van dit rapport	8
2 Omvang van de transportsector	13
2.1 Historische ontwikkeling personenvervoer in Nederland	14
2.2 Historische ontwikkeling vrachtvervoer in Nederland	16
2.3 Historische ontwikkeling omvang verkeer- en vervoersector in EU-15	18
2.4 Vervoersprognoses voor Nederland	20
2.5 Vervoersprognoses voor de EU-25	22
3 Aandeel transport in totale energiegerelateerde CO ₂ -emissies	25
3.1 Historische ontwikkeling van CO ₂ -emissies in Nederland, de EU-15 en de wereld	26
3.2 Prognoses toekomstige CO ₂ -emissies: Nederland, de EU-25 en de wereld	28
4 CO ₂ -emissies en energiegebruik per modaliteit in Nederland	31
4.1 Historische ontwikkeling en projecties van het energiegebruik van verschillende vervoersmodaliteiten in Nederland	32
4.2 Historische ontwikkeling en projecties van de CO ₂ -emissies van verschillende vervoersmodaliteiten in Nederland	34
4.3 Verhouding tussen personen- en goederenvervoer	36
4.4 Emissiefactoren per modaliteit	38
5 Lucht- en scheepvaart	41
5.1 Vervoersprestatie van luchtvaart	42
5.2 Vervoersprestatie van zeescheepvaart	44
5.3 CO ₂ -emissies van lucht- en scheepvaart: allocatie	46
5.4 CO ₂ -emissieprojecties voor lucht- en scheepvaart	48
5.5 Niet-CO ₂ -klimaat effecten van luchtvaart	50
6 CO ₂ -emissies tijdens korte en lange ritten	51
6.1 CO ₂ -emissie van korte en lange ritten: personenvervoer	52
6.2 CO ₂ -emissie van bulk- en non-bulk goederentransport	54
7 Conclusies bij Deel I	57
8 Inleiding bij deel II	61
8.1 Categorisering van reductiemaatregelen	61
8.2 Informatiebronnen	65
8.3 Leeswijzer	66

9	Technische maatregelen voor CO ₂ -reductie bij personenauto's op middellange termijn	67
9.1	Inleiding	67
9.2	Maatregelen om nieuwe personenauto's zuiniger te maken (korte en middellange termijn)	68
9.3	Verlaging van rolweerstand en van wrijving in de motor	77
9.4	Zuinige airco's	79
9.5	Overige technische maatregelen	81
9.6	Inschatting van absolute reductiepotentiëlen voor personenauto's op basis van het GE-scenario	82
9.7	Specifieke beleidsmaatregelen voor zuinige personenauto's	84
9.8	Voorbeelden van bestaand beleid m.b.t. personenauto's	86
10	Technische maatregelen voor bestelauto's	93
10.1	Inleiding	93
10.2	Verbetering van voertuigrendement bij bestelauto's	93
10.3	Andere opties	96
10.4	Inschatting van absolute reductiepotentiëlen voor bestelauto's op basis van het GE-scenario	96
10.5	Specifieke beleidsmaatregelen voor zuinige bestelauto's	98
10.6	Voorbeelden van beleid m.b.t. bestelauto's in andere landen	99
11	Technische maatregelen voor vrachtwagens	101
11.1	Inleiding	101
11.2	Verbetering van motorrendement bij vrachtwagens	102
11.3	Vermindering rolweerstand bij vrachtwagens	103
11.4	Vermindering luchtweerstand bij vrachtwagens	104
11.5	Verhoging van toegestaan voertuiggewicht en/of toegestane lengte bij vrachtwagens	105
11.6	Lichtgewicht constructie bij vrachtwagens	107
11.7	Optimalisatie van vrachtwagens voor lange-afstandtransport	108
11.8	Verbeterde hulpsystemen en accessoires	109
11.9	Inschatting van absolute reductiepotentiëlen voor vrachtwagens op basis van het GE-scenario	110
11.10	Specifieke beleidsmaatregelen voor zuinige vrachtwagens	111
11.11	Voorbeelden van beleid m.b.t. vrachtwagens in andere landen	112
12	Technische maatregelen voor bussen	115
12.1	Inleiding	115
12.2	Opties die ook bij vrachtwagens kunnen worden toegepast	115
12.3	Hybride aandrijving voor bussen	116
12.4	Brandstofcelbussen	117
12.5	Inschatting van absolute reductiepotentiëlen voor bussen op basis van het GE-scenario	118
12.6	Specifieke beleidsmaatregelen voor zuinige bussen	119

13	Alternatieve brandstoffen	121
13.1	Inleiding	121
13.2	Personenauto's op LPG en aardgas	122
13.3	Bussen op aardgas of LPG	128
13.4	Biobrandstoffen in het wegverkeer	130
13.5	Waterstof	139
13.6	Elektriciteit	149
13.7	Specifiek biobrandstoffenbeleid	149
14	Niet-technische maatregelen in het wegverkeer	151
14.1	Energiebewust aankoopgedrag	151
14.2	Het nieuwe rijden	154
14.3	Verkeersmaatregelen	156
14.4	Volumereductie	157
15	CO ₂ -reductie bij overige vervoerwijzen	159
15.1	Spoor	159
15.2	Luchtvaart	159
15.3	Opties voor klimaatbeleid voor luchtvaart	164
15.4	Klimaatdoelstellingen van de luchtvaartsector zelf	166
15.5	Scheepvaart	167
15.6	Opties voor klimaatbeleid voor zeevaart	171
15.7	Opties voor klimaatbeleid voor de binnenvaart	179
16	Generieke beleidsmaatregelen	181
16.1	Inleiding	181
16.2	Prijs- en fiscaal beleid	181
16.3	Emissiehandel	183
16.4	Labelling	185
16.5	OV-beleid	185
16.6	Ruimtelijke ordenings- en infrastructuurbeleid	186
16.7	Overige maatregelen	187
17	Bijdrage van efficiencyverbetering, biobrandstoffen en volume-effecten aan het bereiken van doelen voor 2030: een eenvoudige scenarioverkenning	189
17.1	Inleiding	189
17.2	Scenario's	189
17.3	Conclusies	196
18	Conclusies m.b.t. deel II	199
	Literatuur	205

A	Lijst van afkortingen	219
B	WLO-scenario's	221
C	DG TREN-scenario	223
D	Tabellen bij deel I	225
E	Methodologische aspecten van de beoordeling van opties voor CO ₂ -reductie	249
F	Reductie-opties bij vrachtverkeer volgens ECN (2007)	257
G	Samenvatting van de Japanse 'Top Runner' programma voor HD-voertuigen	259
H	Samenvatting van de resultaten van het HyWays-project	263

Samenvatting

Dit rapport is door CE Delft opgesteld ter ondersteuning van het werk van een commissie bestaande uit leden van de Raad voor Verkeer en Waterstaat, de Algemene Energieraad en de VROM-raad. Deze commissie bereidt een gezamenlijk advies van deze raden voor over de vormgeving van het lange-termijn klimaatbeleid voor de transportsector in Nederland.

Het rapport levert basisinformatie aan over trends in vervoersomvang en CO₂-emissies van de verkeerssector en verschaft, op basis van literatuurinformatie en expert kennis, overzicht en inzicht in de verschillende technische en niet-technische opties voor CO₂-reductie en de beleidsinstrumenten waarmee deze opties geïmplementeerd kunnen worden. Synthese van deze informatie in scenario's of schattingen van potentiële reducties en van kosten voor het halen van bepaalde reductiedoelstellingen was geen onderdeel van de opdracht. Om die reden is het dan ook lastig om het rapport samen te vatten of overall conclusies te trekken. In deze samenvatting beperken we ons derhalve tot het presenteren van een selectie van interessante feiten, inzichten en conclusies uit de verschillende hoofdstukken.

Deel I Kwantitatieve gegevens sector Verkeer en Vervoer

Deel I van dit rapport schetst een gedetailleerd overzicht van de rol van mobiliteit en de verschillende verkeersmodaliteiten in de CO₂-emissie in Nederland en Europa. Historische en voorziene toekomstige ontwikkelingen van omvang van de transportsector en van de CO₂-emissie van transport worden in kaart gebracht. Ook wordt aandacht besteed aan de bijdrage van lucht- en zeevaart. De belangrijkste conclusies uit deel I zijn:

Verkeersomvang

- Wegverkeer is de dominante vervoerwijze in Nederland en Europa.
- Het goederenvervoer is sneller gegroeid dan het personenvervoer in Nederland. In Europa als geheel is het personenvervoer juist sneller gegroeid.
- Verkeersvolumes blijven toenemen in de toekomst. De grootste groei wordt verwacht voor goederen- en personenvervoer over de weg en voor luchtvaart. Dit geldt zowel voor Nederland als voor Europa.
- De vervoersprestatie van de Nederlandse luchtvaart is in 10 jaar tijd verdubbeld. Wanneer alle vertrekkende vliegtuigen in beschouwing worden genomen is het aandeel van luchtvaart in de totale vervoersprestatie voor Nederland (op basis van reizigerskilometers) zo'n 30%.

CO₂ en energiegebruik

- CO₂-emissies van de verkeerssector zijn de afgelopen decennia sterk gegroeid in Nederland en wereldwijd. De groei in Europa lijkt iets minder. Toekomstscenario's laten ook sterke groei zien, maar deze is afhankelijk van de economische groei en de overheidssturing.

- De emissies van CO₂ uit in Nederland verkochte bunkerbrandstoffen is sterk gestegen sinds 1980.
- Wereldwijd neemt de uitstoot van CO₂ verder toe, met name door groei van de emissies van de energiesector en transport. De mobiliteitsgroei in ontwikkelende landen is hier een belangrijke oorzaak van.
- CO₂-emissies van lucht- en scheepvaart stijgen naar verwachting sterk tussen 2000 en 2040.
- Vervoermiddelen zijn de afgelopen jaren niet zuiniger geworden en zonder specifiek beleid neemt het brandstofverbruik per voertuigkilometer in de toekomst niet af.
- De emissies van korte ritten en intra-Europese vluchten hebben een aanzienlijk aandeel in de CO₂-emissies van respectievelijk personenauto's en vliegtuigen.
- In het personenvervoer is het energiegebruik per personenkilometer op korte ritten hoger dan op lange ritten. De broeikasgasemissies van luchtvaart zijn het hoogste, wanneer ook met niet-CO₂-gerelateerde effecten rekening gehouden wordt.
- Bulkvervoer is energie-efficiënter dan non-bulkvervoer (containers), maar de laatste is de grote groeimarkt.

Deel II Inzicht in oplossingsrichtingen en aangrijpingspunten

Deel II van dit rapport geeft een overzicht van de technische en niet-technische maatregelen waarmee de CO₂-emissie van personenauto's, bestelauto's, vrachtwagens, bussen, railvervoer, vliegtuigen en schepen kan worden gereduceerd. Opties worden beschreven in termen van werkingsprincipe, CO₂-reductiepotentieel, kosten, voor- en nadelen en synergie met andere beleidsaspecten (bijv. luchtverontreiniging, congestie of veiligheid). Ook wordt nader ingegaan op de verschillende specifieke en generieke beleidsinstrumenten waarmee de toepassing van deze opties kan worden gestimuleerd.

M.b.t. de technische en niet-technische opties kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd:

Technische maatregelen in het wegverkeer

Personenauto's

- Personenauto's kunnen tussen nu en 2030 door technische maatregelen aan motor, transmissie en voertuig 40% tot 50% zuiniger worden bij gelijkblijvende functionele kenmerken (grootte, prestaties). De belangrijkste opties daarbij zijn verbeteringen aan de verbrandingsmotor, toepassing van hybride aandrijving, en verlaging van voertuiggewicht, rolweerstand en luchtweerstand. Daar bovenop is CO₂-reductie mogelijk door downsizing van voertuigen (kleinere voertuigen, lichter gemotoriseerd).
- De netto CO₂-reductie op langere termijn hangt echter wel af van autonome ontwikkelingen m.b.t. voertuigomvang, luxe en voertuiggewicht en de verdeling van verkopen over voertuigen in verschillende grootteklassen.



- Lage rolweerstandsbanden en smeermiddelen met een lage viscositeit leveren slechts enkele procenten CO₂-reductie op maar kunnen wel binnen korte tijd op de gehele vloot worden toegepast.
- Brandstofcelvoertuigen leveren een verdere verbetering van het voertuigrendement. De netto CO₂-winst hangt echter af de bronnen waaruit de benodigde waterstof wordt geproduceerd en de CO₂-emissies die in deze ketens optreden.
- De kosten van vergaande efficiencyverbetering bij personenauto's zijn voornamelijk nog relatief hoog. CO₂-vermijdingskosten (op basis van maatschappelijke kosten) voor reducties tot 25 - 30% zijn in de orde van 100 tot 200 €/ton. Ook op consumentenniveau verdienen de kosten van veel energiebesparende technieken zich niet volledig terug door de besparing op brandstofkosten. De toepassing op nieuwe voertuigen van systemen die de bandenspanning controleren heeft wel negatieve vermijdingskosten.
- Op lange termijn kunnen kosten van technische maatregelen aan voertuigen sterk dalen als gevolg van leereffecten, economy-of-scale en innovatie. Het is echter lastig om te voorspellen welke kostenreducties haalbaar zijn.

Bestelauto's

- Technische opties om bestelauto's zuiniger te maken zijn grotendeels dezelfde als bij personenauto's.

Vrachtwagens

- In vergelijking met personenauto's zijn over de reductieopties voor vrachtwagens relatief weinig gegevens beschikbaar.
- Omdat bij vrachtwagens brandstofverbruik altijd een belangrijk ontwerp-criterium is geweest, is het nog resterende CO₂-reductiepotentieel bij deze categorie voertuigen relatief klein (ongeveer 20%).
- Verschillende opties zijn slechts op een deel van de vloot toepasbaar. Langere voertuigen, verhoging van het toegelaten voertuiggewicht en vermindering van luchtweerstand hebben alleen effect op voertuigen voor langeafstandsvervoer. Hybride aandrijving en brandstofcellen zijn met name geschikt voor stedelijke toepassing (distributie).

Bussen

- Belangrijke technische opties voor CO₂-reductie bij bussen zijn verbetering van motorrendement, verlaging van gewicht en toepassing van hybride aandrijving (m.n. stadsbussen).
- Door het veel hogere aantal kilometers gedurende de levensduur van het voertuig zijn de CO₂-vermijdingskosten voor deze opties bij bussen lager dan bij personenauto's.

Alternatieve brandstoffen

- De alternatieve brandstoffen die in dit rapport behandeld worden zijn LPG, CNG, 1^e en 2^e generatie biobrandstoffen, waterstof en elektriciteit. Voor een vergelijking van de effecten op CO₂-emissies (en overige broeikasgassen) wordt de gehele energieketen ('well-to-wheel') in beschouwing genomen.

- De ketenemissies van LPG en CNG zijn vergelijkbaar met of iets lager dan die van diesel, en nemen toe wanneer de brandstof over grotere afstanden wordt aangevoerd. Door het lage reductiepotentieel zijn de CO₂-vermijdingskosten relatief hoog.
- 1^e generatie biobrandstoffen worden hoofdzakelijk gemaakt uit olie- of zetmeelhoudende zaden, uit suikerbieten, of uit suikerriet. Voor de productie is nog veel fossiele brandstof nodig. De well-to-wheel reductie van broeikasgassen is voor de verschillende 1^e generatie brandstoffen zeer verschillend, maar gemiddeld slechts rond de 50%.
- Er zijn processen in ontwikkeling voor 2^e generatie biobrandstoffen die worden geproduceerd uit houtachtige biomassa of plantaardig afval. Deze leveren over de hele keten CO₂-reducties van zo'n 90%.
- De belangrijkste 1^e generatie biobrandstoffen zijn op dit moment ethanol (door vergisting geproduceerd uit graan, suikerbieten en suikerriet) en biodiesel (door verestering geproduceerd uit plantaardige olie). Daarnaast is er aandacht voor ondermeer MTBE en ETBE uit bio-ethanol, biogas en 2^e generatie biobrandstoffen zoals ethanol uit lignocellulose en synthetische biodiesel (biomass-to-liquid - BTL).
- Biobrandstoffen kunnen puur worden toegepast, maar kunnen ook worden bijgemengd bij benzine (ethanol, MTBE, ETBE), diesel (biodiesel en BTL) en aardgas (biogas, waterstof).
- De CO₂-vermijdingskosten van biobrandstoffen liggen vooralsnog op enige honderden Euro's per ton. Toepassing van alternatieve brandstoffen in bijvoorbeeld elektriciteitsopwekking levert lagere CO₂-vermijdingskosten dan toepassing in voertuigen.
- De duurzaamheid van biobrandstoffen in een bredere context dient gecertificeerd te worden, waarbij ook effecten op biodiversiteit, landgebruik (bijv. kappen van tropisch regenwoud), lokale economie, arbeidsomstandigheden en concurrentie met natuur en voedsel- en veevoerproductie worden meegenomen.
- Veel studies tonen aan dat de wereldwijd beschikbare hoeveelheid land voor productie van biomassa beperkt is. Omdat inzet van biomassa voor bijv. elektriciteitsopwekking kosteneffectiever is dan inzet in de transportsector zal slechts een beperkt deel van de wereldwijd geproduceerde hoeveelheid biomassa beschikbaar zijn voor de transportsector. Voor het halen van de langetermijn reductiedoelstellingen in de transportsector is het dus ook nodig dat voertuigen significant zuiniger worden en zuiniger worden gebruikt.
- Waterstof en elektriciteit kunnen worden gemaakt uit alle vormen van primaire energie. Netto reductie van CO₂-emissies treedt op wanneer gebruik wordt gemaakt van fossiele brandstoffen in combinatie met CO₂-afvang en opslag, van kernenergie of van duurzame bronnen als biomassa, zonne- en windenergie. Voor waterstof hebben thermische productieprocessen een gunstiger rendement dan elektrolyse.
- Waterstof en elektriciteit kennen vooralsnog allebei beperkingen m.b.t.:
 - de opslag aan boord van voertuigen waardoor de actieradius van de voertuigen wordt beperkt;
 - de inrichting van een distributie-infrastructuur
 - de prijs van voertuigen en levensduur van componenten.



Niet technische maatregelen in het werverkeer

- Aankoopgedrag is een belangrijke determinant voor de huidige trend in de CO₂-emissie van personenauto's. De aanschaf van kleinere voertuigen of de keuze voor de zuinigste voertuigen binnen een klasse leidt tot aanzienlijke CO₂-reducties (beide 10-20%).
- Het praktijkverbruik van personenauto's kan zo'n 5% worden gereduceerd door toepassing van een energiezuinige rijstijl.
- Verbetering van doorstroming en verlaging van de rijsnelheid kunnen bijdragen aan vermindering van de CO₂-emissie van de gehele vloot.
- Volumereductie kan plaatsvinden door vermindering van de mobiliteitsbehoefte of door verbetering van de vervoersefficiëncy door dezelfde vervoersprestatie of toegevoegde waarde te leveren met minder voertuigkilometers.
- Een back-of-the-envelope analyse op basis van het GE-scenario laat zien dat voor het halen van uitdagende CO₂-reductiedoelen (bijv. 50% reductie in 2030 t.o.v. 2005) naast maatregelen op het gebied van efficiëncy en CO₂-arme of CO₂-neutrale brandstoffen in alle geval beheersing van de volumegroei noodzakelijk is. Bij conservatieve aannamen m.b.t. het potentieel van efficiëncy-maatregelen en biobrandstoffen is er zelfs een netto volumereductie t.o.v. 2005 nodig.

Technische en niet-technische maatregelen bij overige vervoerwijzen

- Bij het spoor zijn nog wel mogelijkheden voor CO₂-reductie, maar door het geringe aandeel in de totale transportemissies is de bijdrage daarvan beperkt.
- Bij vliegtuigen zijn technische maatregelen mogelijk aan nieuwe en aan bestaande vliegtuigen. Ook zijn er verschillende operationele maatregelen die significante CO₂-reductie kunnen bewerkstelligen. De belangrijkste is verbetering van air traffic management. Dit kan 8 tot 10% besparing opleveren.
- Bij scheepvaart zijn eveneens technische maatregelen mogelijk aan nieuwe en aan bestaande vaartuigen. Ook in deze sector zijn er verschillende operationele maatregelen die forse CO₂-reducties kunnen bewerkstelligen. Opties met een groot potentieel zijn vermindering van de waterweerstand, verbetering van motorrendement of toepassing van gasturbines, verbeterd onderhoud alsmede verbeteringen van de logistiek en verlaging van de vaarsnelheid.

Beleidsmaatregelen

Beleidsmaatregelen zijn nodig om gewenste ontwikkelingen m.b.t. CO₂-reductie, toepassing van nieuwe technologieën en gedragsverandering te bewerkstelligen. Er kan onderscheid worden gemaakt in generieke en specifieke beleidsmaatregelen. Specifieke maatregelen richten zich op een bepaalde techniek of toepassing. Voorbeelden zijn BPM-vrijstelling voor hybride auto's en overheidscampagnes ter bevordering van het nieuwe rijden. Generieke maatregelen stimuleren CO₂-reductie door technische of gedragsaanpassingen, maar laten actoren meer ruimte om zelf te bepalen welke optie bij hun situatie past en in die situatie het meest kosteneffectief is. Emissiehandel en CO₂-differentiatie zijn voorbeelden van generieke maatregelen.

Tabel 1 geeft een overzicht van beleidsmaatregelen die in verschillende deelsectoren of voor de transportsector als geheel kunnen worden ingezet, en geeft aan op welke aspecten van het systeem deze maatregelen direct of indirect aangrijpen.

Tabel 1 Algemeen overzicht van beleidsinstrumenten voor reductie van CO₂-emissies en de aspecten waarop deze maatregelen direct of indirect aangrijpen

Categorie instrument	Aangrijpingspunten → Instrumenten ↓	Gedrag	Gebruik/ efficiëntie	Techniek			Keus vervoer- middel	Volume
				Voertuig- techniek	Brandstoffen / energiedragers	Overige techniek		
Infrastructuur	CO ₂ in ontwerpeisen / MER voor weginfrastructuur		X					X
	investeren in OV-infrastructuur		i				X	
	verkeersmanagement	X	X				i	
	stimulering / aanleggen alternatieve energie- infrastructuur				X			
Ruimtelijke ordening	CO ₂ in ontwerpeisen / MER voor ruimtelijke plannen		i				X	X
Informatie-verschaffende voorzieningen en organisatie	ontwikkelen en verspreiden kennis over duurzame mobiliteit en efficiënte logistiek (kennisinfrastructuur)	X	X			X	X	X
	productkeuze-informatie voor consumenten en professionele gebruikers	X	X				X	
Directe regulering	CO ₂ -emissionormen voor voer-/vaar-/vliegtuigen			X	i			i
	verplicht aandeel biobrandstoffen			i	X			i
	verplichte bijmenging biobrandstoffen			i	X			i
	normen voor efficiënte componenten, bijv. banden, airco's					X		
	CO ₂ - of verbruikseisen in aanbesteding OV (bussen)			X	X			
Indirecte regulering (financieel-economische in-strumenten, fysieke voorzieningen,...)	CO ₂ -differentiatie van belastingen			X	X	?	X	(X)
	km-heffing	X	X					X
	CO ₂ -differentiatie van km-heffing	X		X	X	?		(X)
	emissiehandel i.c.m. emissieplafond opgelegd aan bijv. brandstofproducenten, voertuigbezitters of vervoersbedrijven	X	X	X	X	X	X	X
Sociale regulering: (feedback, informatie, argumenten, educatie en afspraken,...)	convenant met bijv. auto-industrie, brandstofproducenten, luchtvaartmaatschappijen, reders, etc.			X	X	X		
	energie- of CO ₂ -labelling	X		i	i	i		
	campagnes, bijv. Het Nieuwe Rijden	X	X	X	X	X	X	X
	energiezuinig rijden in rijopleiding	X	X					
Stimulering/marketing: - R&D (subsidie,...) - innovatie (subsidie, ..) - marktintroductie (subsidie, informatie,...) - marktdiffusie (subsidie, beloningen, informatie,...)	duurzaam inkopen door overheid	i		X	X	X	X	
	R&D subsidie			X	X	X		
	subsidie op praktijkproeven en demo's			X	X	X		
	tijdelijke aankoopsubsidie	X		X	X	X		
	tijdelijk belastingvoordeel voor zuinige voer-/vaar-/ vliegtuigen of alternatieve brandstoffen, bijv. versnelde afschrijving van investering	X		X	X	X		

X = aspect waarop beleidsinstrument direct aangrijpt
i = aspect waarop beleidsinstrument indirect invloed heeft



1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Een commissie bestaande uit leden van de Raad voor Verkeer en Waterstaat, de Algemene Energieraad en de VROM-raad bereidt een advies voor over de problematiek rond mobiliteit en CO₂. Centraal in de adviesaanvraag staat de vraag hoe het lange-termijn-klimaatbeleid voor de transportsector er uit zou moeten zien. Daarbij gaat het om de transportsector in de volle breedte, inclusief lucht- en zeevaart.

Om tot een advies te kunnen komen is een overzicht benodigd van de feitelijke ontwikkelingen in de CO₂-uitstoot, de verschillende bijdragen die diverse modaliteiten aan de CO₂-uitstoot leveren, mogelijke oplossingsrichtingen en inzicht in wat van de verschillende oplossingsrichtingen verwacht kan worden. Het in kaart brengen van de CO₂-emissie van transport betreft zowel historische als voorziene toekomstige ontwikkelingen.

1.2 Doelstelling en projectkader

Doel van het project is om bestaande informatie m.b.t. CO₂ en mobiliteit te verzamelen en inzichtelijk te presenteren en te visualiseren. Belangrijk daarbij is om informatie uit uiteenlopende bronnen onder dezelfde noemer te brengen en zowel kwantitatief als kwalitatief vergelijkbaar te maken.

Dit rapport bestaat uit de volgende onderdelen:

- Deel I Kwantitatieve gegevens m.b.t. de sector Verkeer en Vervoer.
- Deel II Inzicht in oplossingsrichtingen en aangrijpingspunten.

Het deel I van dit rapport geeft een overzicht van historische ontwikkelingen en toekomstprognoses voor de volgende onderwerpen:

- Omvang van de transportsector.
- Aandeel transport in de totale energierelateerde CO₂-emissies.
- Verhouding CO₂-emissies goederen- en personenverkeer.
- CO₂-emissies en energiegebruik per modaliteit.
- CO₂-emissies voor internationale lucht- en scheepvaart.
- Klimaatimpact luchtvaart.
- CO₂-emissies tijdens lange en korte ritten.

Deel II van dit rapport beschrijft de technische en niet-technische opties waarmee in wegverkeer, luchtvaart en scheepvaart de emissies van CO₂ kunnen worden gereduceerd. Opties worden beschreven op de volgende aspecten:

- Wat houdt die optie in?
- Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?
- Voor- en nadelen.
- Indien mogelijk kosten(range) per vermeden ton CO₂.

- Instrumenteerbaarheid optie (o.a. wat is bekend van beleidsinstrumenten om met deze optie emissiereducties te realiseren?).
- Is er synergie met andere gebieden als luchtkwaliteit, geluid, congestie?

In deel II worden tevens specifieke en generieke beleidsmaatregelen besproken waarmee implementatie van deze oplossingen kan worden gestimuleerd of afgedwongen. Ook wordt beknopt informatie gegeven over relevante experimenten en beleidsinitiatieven in andere landen met verschillende beleidsinstrumenten gericht op CO₂-reductie in verkeer en vervoer.

1.3 Afbakening en uitgangspunten

Deel I van dit rapport schetst historische ontwikkelingen op basis van statistische data. Data uit verschillende statistische bronnen zijn in de regel niet volledig consistent of niet eenvoudig vergelijkbaar door het gebruik van verschillende definities, categorieën en eenheden. Voor dit rapport zijn data uit verschillende bronnen zodanig bewerkt/weergegeven dat ze goed vergeleken kunnen worden.

Voor de beschrijving van toekomstige ontwikkelingen is gebruik gemaakt van beschikbare prognoses. Deze zijn gebaseerd op modelberekeningen en worden in de regel gepresenteerd in de vorm van scenario's. Prognoses uit verschillende studies kunnen sterk uiteenlopen door verschillen in modelstructuur en scenario-aannamen. Voor Nederland wordt in dit rapport gebruik gemaakt van de meest recente WLO (welvaart en leefomgeving¹)-scenario's (MNP, 2006a). Prognoses voor Europa zijn voornamelijk gebaseerd op gegevens van DG-TREN (DG-TREN 2006).

Deel II schetst een overzicht van technische en niet-technische maatregelen om de CO₂-emissies van transport te reduceren. Er wordt zoveel mogelijk kwantitatieve informatie gegeven. Het was echter niet de opdracht om onderzoek uit te voeren naar de totale reducties die met verschillende opties mogelijk zijn noch om scenario's te ontwikkelen.

1.4 Opbouw van dit rapport

Deel I omvat hoofdstuk 2 t/m 6. Hoofdstuk 2 behandelt de historische en verwachte omvang van de transportsector in termen van vervoersprestatie in Nederland, Europa en wereldwijd. De totale energiegerelateerde CO₂-emissies in Nederland, Europa en wereldwijd, en het aandeel van transport daarin, worden onder de loupe genomen in hoofdstuk 3. Totale emissies en emissiefactoren (emissies per kilometer) voor de verschillende modaliteiten in Nederland worden nader toegelicht in hoofdstuk 4. Een belangrijk aandachtspunt daarbij is de verhouding tussen personen- en goederenvervoer.

In hoofdstuk 5 gaan we dieper in op lucht- en zeescheepvaart. Omdat lucht- en zeescheepvaart meestal niet in de geëigende statistieken en voorspellingen te

¹ Zie <http://www.welvaartenleefomgeving.nl/>.



rug te vinden zijn, met name omdat er geen goede definitie is voor toedeling aan landen, behandelen we deze modaliteiten apart.

Hoofdstuk 6 ten slotte zoomt in op de CO₂-emissies per personenkilometer tijdens korte en lange ritten en op de verschillen in CO₂-emissies per tonkilometer tussen vervoer van bulk- en andere goederen.

In de verschillende hoofdstukken van deel I worden ontwikkelingen grafisch weergegeven en in de begeleidende tekst toegelicht of verklaard. In de bijlagen bij dit rapport is achtergrondinformatie te vinden over bijvoorbeeld scenario's waarmee toekomstprognoses zijn opgesteld en is het cijfermateriaal dat ten grondslag ligt aan de in het rapport gepresenteerde figuren in tabelvorm opgenomen.

Deel II verkent allereerst technische oplossingen voor personenauto's, bestelauto's, vrachtwagens en bussen in hoofdstuk 9 t/m 12. In hoofdstuk 13 wordt ingegaan op alternatieve brandstoffen met een focus op wegverkeer. Hoofdstuk 14 behandelt vervolgens niet-technische maatregelen in het wegverkeer. Reductie-opties bij spoor, luchtvaart en scheepvaart worden besproken in hoofdstuk 15. Hoofdstuk 16 behandelt generieke beleidsmaatregelen, terwijl in hoofdstuk 17 inzichtelijk wordt gemaakt welke rol maatregelen op het gebied van efficiency, biobrandstoffen en verkeersvolume spelen bij het halen van ambitieuze lange-termijn reductiedoelstellingen. Hoofdstuk 18 sluit af met enige conclusies.



State-of-the-Art CO₂ en Mobiliteit

Deel I - Kwantitatieve gegevens
m.b.t. de sector Verkeer en Vervoer

Rapport

Delft, juli 2007

Opgesteld door: R.T.M (Richard) Smokers
L.C. (Eelco) den Boer
J. (Jasper) Faber





2 Omvang van de transportsector

2.1 Historische ontwikkeling personenvervoer in Nederland

In Figuur 1 en Figuur 2 geven we de historische ontwikkeling van het personenvervoer weer. Het blijkt dat de omvang van de personenverkeersector in Nederland de afgelopen decennia sterker is gegroeid dan de bevolkingsomvang: sinds 1985 is het totale transportvolume met 38% toegenomen. Het autoverkeer heeft het grootste aandeel in het totale transportvolume, 87% in 2003. Het totale aantal reizigerskilometers per auto groeide tussen 1985 en 2003 met 37%. Met name op snelwegen is het verkeersvolume sterk toegenomen.

Tussen 1985 en 2000 is het personenvervoer per spoor met een factor 2 in omvang gestegen. Na 2000 tekent zich een stabilisatie af. De absolute groei van het personenvervoer per spoor is echter veel kleiner dan de groei bij het personenvervoer over de weg.

Luchtvaart heeft een sterke ontwikkeling doorgemaakt. Sinds 1990 is het aantal passagierskilometers met 7% per jaar toegenomen². Wanneer we deze kilometers in beschouwing nemen is het aandeel luchtvaart 29% in 2002. Dit heeft te maken met de positie van Schiphol in het transitoverkeer. In hoofdstuk 5 gaan we dieper op luchtvaart in.

Lopen en fietsen hadden in 2000 tezamen een aandeel van 3% in de totale verkeersprestatie in de EU. In steden is dit aandeel veel groter. In bijvoorbeeld een stedelijke provincie als Zuid-Holland was het aandeel van lopen en fietsen bijna 10% in 2005. Dit percentage is al sinds 1985 constant.

Er zijn verschillende oorzaken te noemen voor de snelle groei van het transportvolume van de afgelopen 20 jaar in Nederland en de EU:

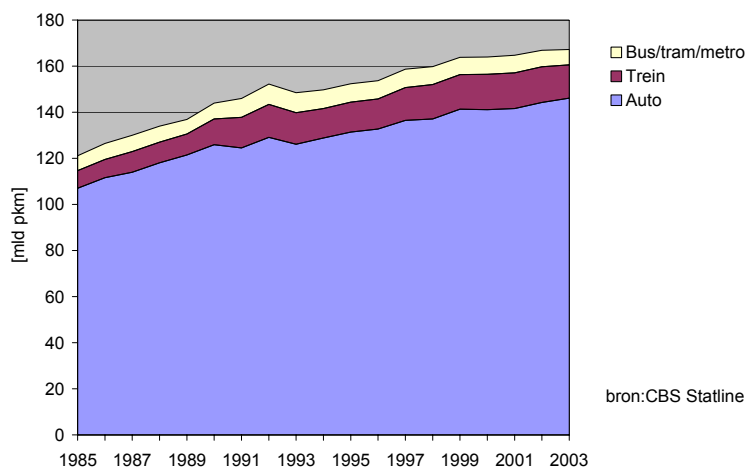
- Een eerste oorzaak is de combinatie van sterke inkomensstijging, individualisering (afname van de gemiddelde bezettingsgraad van 1,7 naar 1,5 persoon per auto), verdunning van huishoudens, emancipatie, toename van tweeverdieners en van taakcombinatie. Een grote groep mensen bereikte de 'actieve' leeftijdscategorie tussen de 20 en de 65 jaar. De groei van deze categorie heeft vooral geleid tot een toename van het autobezit.
- Daarnaast zijn veel vervoerswijzen sneller geworden, onder meer door betere wegverbindingen.

Per capita is het aantal gereisde kilometers in Nederland toegenomen van 8.400 km in 1985 tot 10.300 km in 2003 (exclusief luchtvaart). Niet het aantal verplaatsingen is toegenomen, maar de afstand per verplaatsing. Het aanbod van sneller vervoer speelt hierin een belangrijke rol.

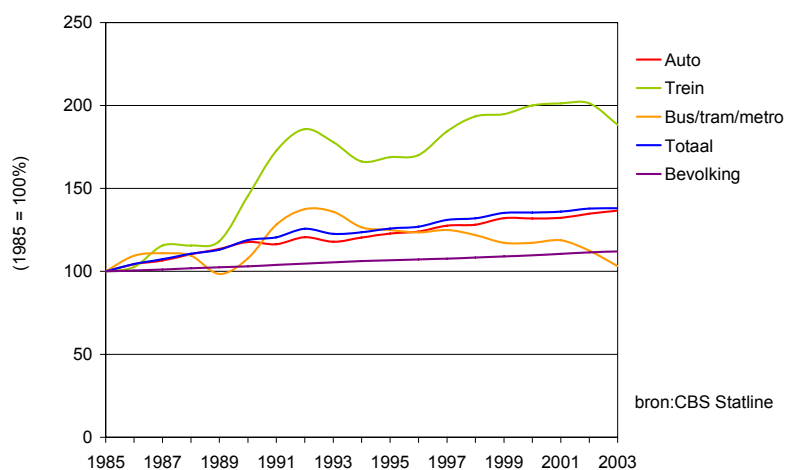
² Meegerekend zijn alle vertrekkende vluchten bij intra-EU-vluchten en alle vertrekken en aankomsten bij extra-EU-vluchten).



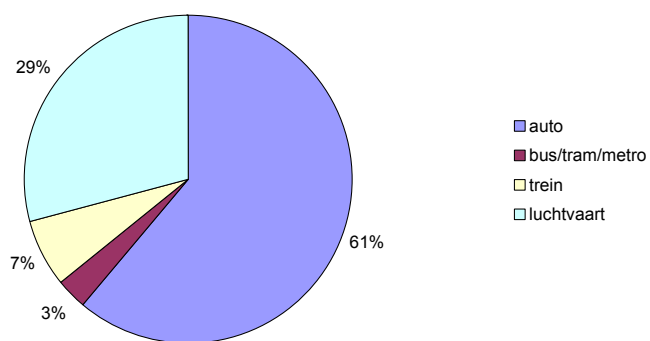
Figuur 1 Absolute ontwikkeling Nederlands personenvervoer



Figuur 2 Relatieve ontwikkeling Nederlands personenvervoer



Figuur 3 Modal split personenvervoer in 2002 (pkm)



2.2 Historische ontwikkeling vrachtvervoer in Nederland

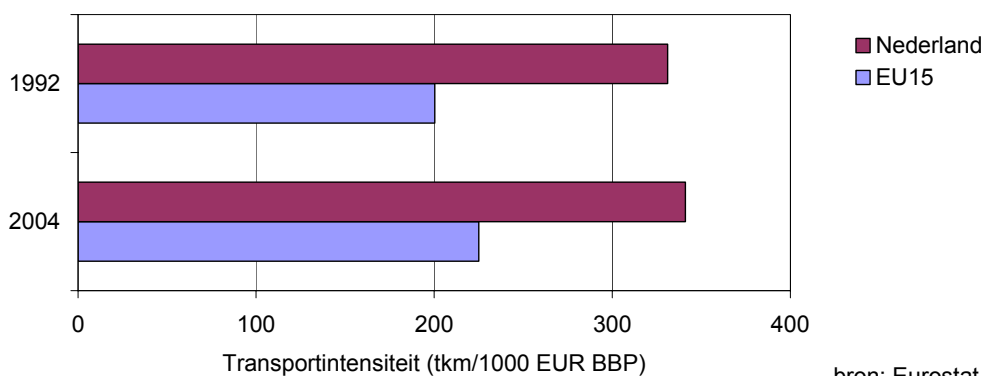
In Figuur 5 t/m Figuur 7 presenteren we de historische ontwikkeling van het goederenvervoer in Nederland. Het goederenvervoer is sterker gegroeid dan het personenvervoer. De groei bedraagt 50% in de periode 1985-2003. De groei van het goederenvervoer is relatief sterk gekoppeld aan het BBP. Tussen 1999/2000 en 2003 is de economie minder hard gegroeid, en is de omvang van de goederenvervoersector ongeveer gelijk gebleven. Goederenvervoer over de weg is weliswaar toegenomen maar de vervoersprestatie van binnenvaart is afgenomen.

Recente cijfers laten zien dat bij het aantrekken van de economie het goederenvervoer weer sterk toegenomen is.

Ten opzichte van Europa heeft Nederland een unieke vervoerssector. Het aandeel binnenvaart is het grootste van heel Europa. Dat heeft vanzelfsprekend te maken met het grote aantal rivieren dat door Nederland stroomt en de internationale functie van de Rotterdamse haven. Waar de binnenvaart in 1985 echter nog het grootste aandeel had in het totaal vervoerde volume, heeft het wegvervoer deze positie overgenomen. Dit heeft te maken met de grotere snelheid en flexibiliteit van het wegvervoer. In 2003 was het aandeel van wegvervoer in het totale transportvolume ruim 52%.

Een groot deel van het Nederlandse goederenvervoer is doorvoer naar het Europese achterland. De haven van Rotterdam zorgt voor veel aanvoer van goederen die per vrachtauto, spoor en binnenvaart worden doorgevoerd. Vanwege de sterk op transport gerichte economie is de transportintensiteit (tonkm/EUR BBP) van Nederland hoog ten opzichte van andere Europese landen. De transportintensiteit van Nederland ligt ongeveer de helft hoger dan het EU-15 gemiddelde. In landen als Denemarken, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk is de economie meer gericht op dienstverlening (Figuur 4).

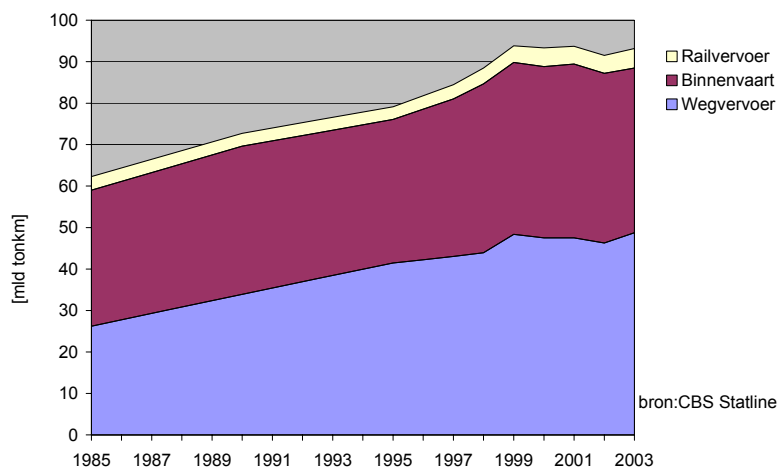
Figuur 4 Transportintensiteit Nederland versus EU-gemiddelde



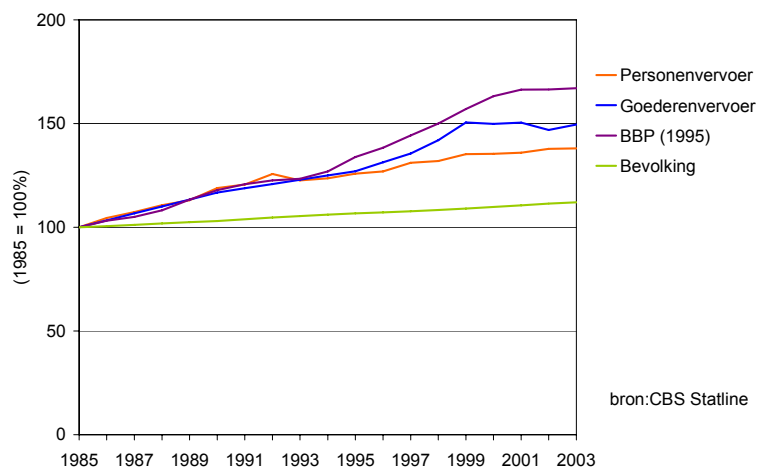
Noot: Zeescheepvaart niet meegerekend.



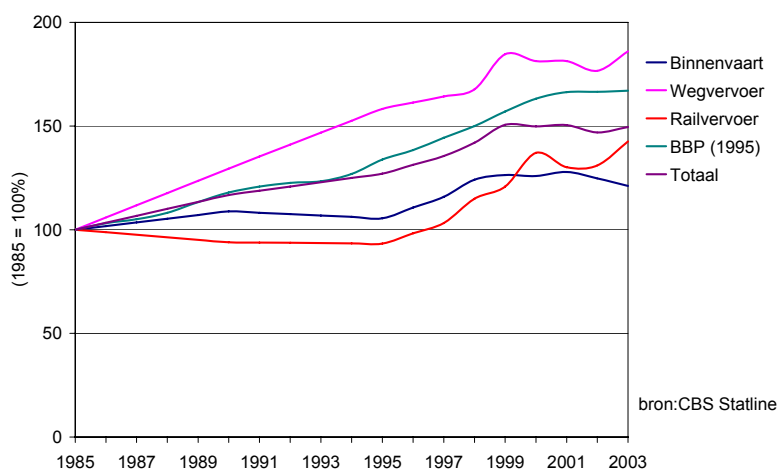
Figuur 5 Vervoersprestatie goederenvervoer in Nederland



Figuur 6 Relatieve ontwikkeling goederenvervoer en personenvervoer versus BBP



Figuur 7 Relatieve ontwikkeling tonkilometers en BBP



2.3 Historische ontwikkeling omvang verkeer- en vervoersector in EU-15

In Figuur 9 en Figuur 10 wordt de historische ontwikkeling van de verkeer- en vervoersector in Europa (EU-15) weergegeven. Ook binnen Europa is de auto het belangrijkste vervoermiddel in het personenvervoer. Het aandeel openbaar vervoer is in Europa gemiddeld iets groter dan in Nederland. De groei van de totale transportomvang van het personenvervoer is in Europa iets groter dan in Nederland, 45% in Europa ten opzichte van 38% in Nederland tussen 1985 en 2003. Luchtvaart wordt behandeld in hoofdstuk 5. Het aandeel van luchtvaart in de totale vervoersprestatie in de EU-15 is sterk gegroeid van 7% in 1990 tot 12% in 2002.

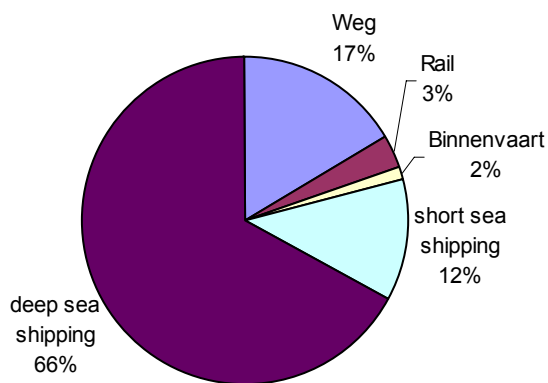
Voor de goederenmobiliteit is de aanhoudende economische groei de belangrijkste determinant. Ook het wegvallen van de Europese binnengrenzen en de groei van de EU hebben bijgedragen aan de groei en zullen nog verdere groei veroorzaken. Schaalvergroting en efficiencyverbetering hebben gezorgd voor een reële daling van de transportkosten, waardoor transport goedkoper is geworden. Transportkosten zijn vergeleken met loonkosten minder belangrijk geworden, waardoor het aantrekkelijker is geworden om productie en consumptie op verder van elkaar gelegen plekken te laten plaatsvinden.

De bovenstaande ontwikkelingen hebben ervoor gezorgd dat de vervoersprestatie van het goederenvervoer meer dan verdubbeld is sinds 1970, waarbij de groei bijna volledig toegeschreven kan worden aan het wegvervoer. Ten opzichte van Nederland is het aandeel van wegvervoer in Europa veel groter. Dit komt omdat binnenvaart slechts een kleine rol speelt in Europa. In tegenstelling tot Nederland laat de EU recent geen daling van de groei van het goederenvervoer zien, omdat de economische stagnatie in andere EU-landen minder sterk is geweest.

Voor zeescheepvaart zijn weinig statistische data voorhanden. De beperkte informatie die er is laat echter zien, dat het aandeel in de vervoersprestatie hoog is, wanneer alle tonkilometers in ogenschouw worden genomen (Figuur 8). In hoofdstuk 5 gaan we dieper op zeevaart in.

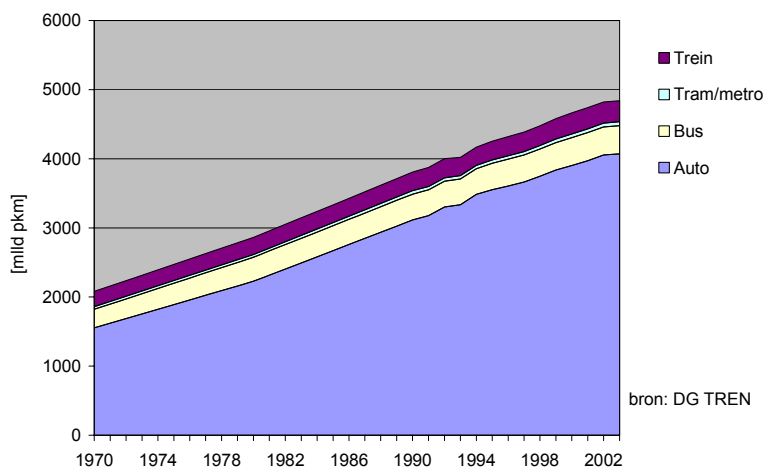


Figuur 8 Aandeel zeevaart in totale vervoersprestatie (tonkm, 2001)

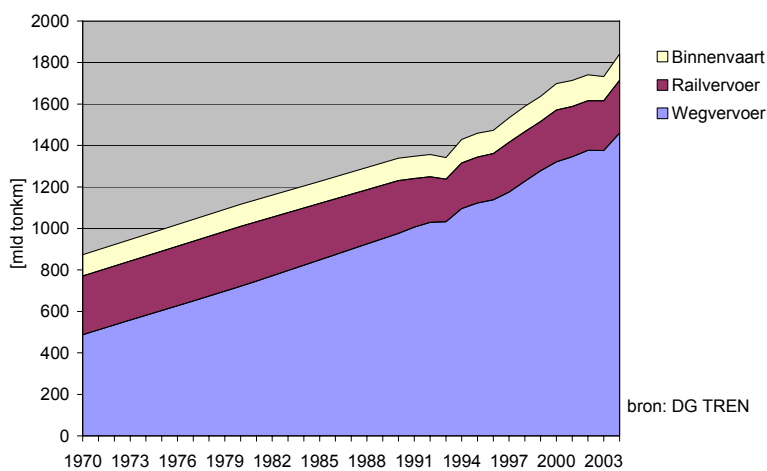


Noot: Alle binnenlandse, intra-EU en 50% van alle extra-EU tkm van zeevaart zijn meegenomen.

Figuur 9 Ontwikkeling vervoersprestatie personenvervoer in EU-15



Figuur 10 Ontwikkeling vervoersprestatie goederenvervoer in EU-15



2.4 Vervoersprognoses voor Nederland

Voor Nederland zijn door de drie planbureaus CPB, MNP en ECN vier referentiescenario's voor de toekomst ontwikkeld (zie Tabel 2, alsmede bijlage B voor een uitgebreidere beschrijving en (WLO, 2006) en (MNP 2006a)). Deze WLO-scenario's (WLO: welvaart en leefomgeving) dienen als referentie voor de ontwikkeling van toekomstig beleid. De scenario's verschillen van elkaar op het gebied van aannames m.b.t. economische groei, internationale samenwerking en de ontwikkeling van de collectieve sector (bijv. meer of minder sturing). We kiezen ervoor om het GE-scenario verder uit te werken, omdat dit het meest relevante scenario is, wanneer er geen sturing optreedt in de toekomst. Dit is het meest beleidsarm.

Tabel 2 Vier referentiescenario's voor Nederland (WLO, 2006)

STRONG EUROPE (SE) Mondiale handel met voortgaand Europees milieubeleid.	GLOBAL ECONOMY (GE) Mondiale vrijhandel, huidige EU milieunormen continueren (stand still).
REGIONAL COMMUNITIES (RC) Handelsblokken en heffingen ter bescherming van het milieu, accent op nationaal milieubeleid.	TRANSATLANTIC MARKET (TM) Handelsblokken en importheffingen ter bescherming van de nationale productie, geen sterk milieubeleid.

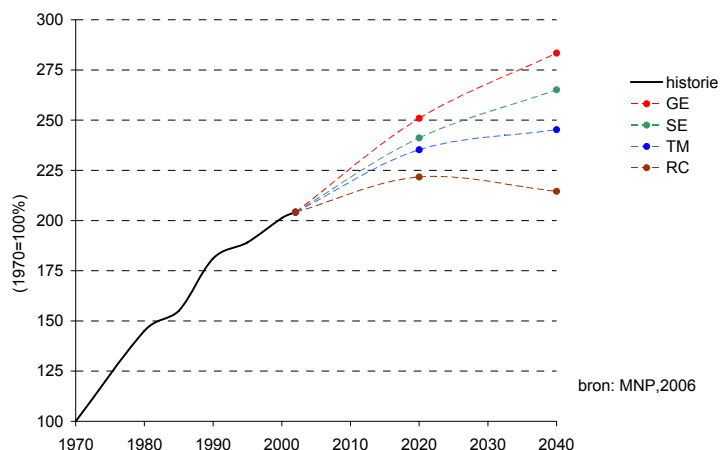
De scenario's lopen uiteen op het gebied van veronderstelde BBP- en bevolkingsgroei. Dit zijn belangrijke indicatoren voor het personenautobezit en de groei van de verkeersvolumes. In bijlage A gaan we dieper op de WLO-scenario's in.

De ontwikkeling van de omvang van de personenmobiliteit is voor de vier scenario's weergegeven in Figuur 11. Tot 2020 stijgt het verkeersvolume in alle scenario's. Na 2020 laten het GE-, SE- en TM-scenario een gematigder groei zien, terwijl in het RC scenario de transportsector zelfs in omvang afneemt na 2020.

In Figuur 12 is voor het wegverkeer in Nederland de ontwikkeling van het absolute verkeersvolume per vervoerwijze in het GE-scenario afgebeeld. De relatieve ontwikkeling van verschillende vervoerwijzen voor personen- en goederenvervoer in het GE-scenario is weergegeven in Figuur 13. Uit de figuur blijkt dat de verkeersvolumes van personenauto's, vrachtauto's en bestelauto's blijven groeien in de toekomst. Het aantal vrachtautokilometers stijgt het snelste. Dit verdubbelt tussen 2000 en 2040. Het aantal vliegbewegingen (vertrek+aankomst) zal toenemen met 38% tussen 2000 en 2020 maar is stabiel tussen 2020 en 2040. Opvallend is de sterke stijging van het railvervoer (personen- en goederenvervoer met dieseltreinen). Het goederenvervoer over het spoor met dieseltreinen neemt in dit scenario tussen 2000 en 2040 met bijna een factor 4 toe.

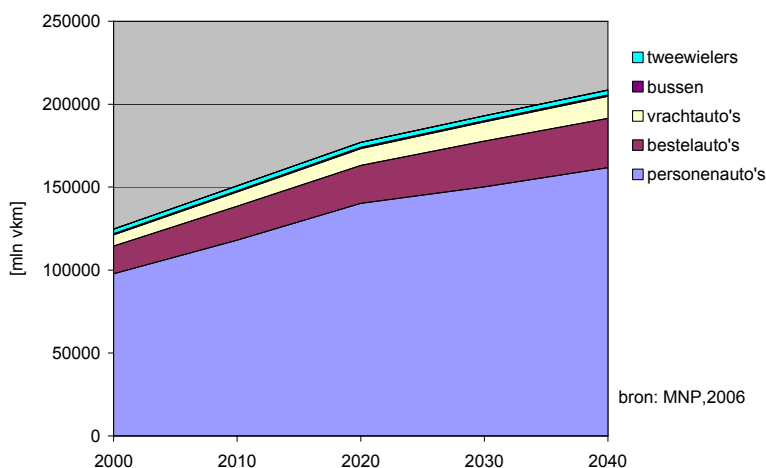


Figuur 11 Vervoersprestatie personenvervoer in WLO-scenario's (pkm)

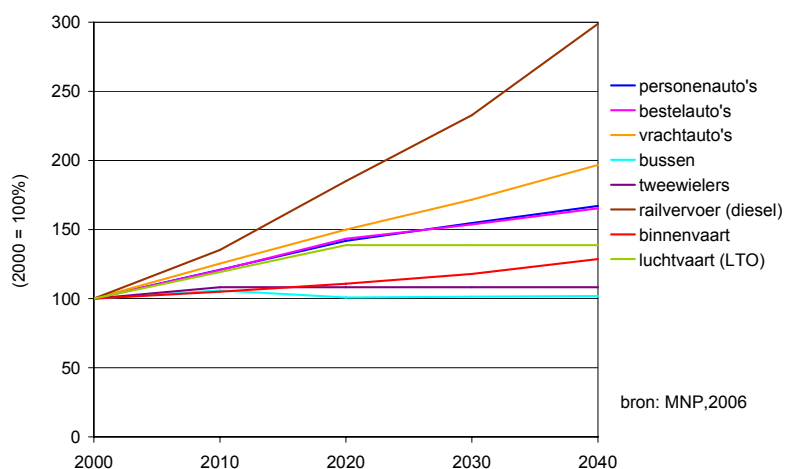


Noot: Luchtvaart niet opgenomen.

Figuur 12 Prognose van verkeersvolume per vervoerwijze voor wegtransport in GE-scenario



Figuur 13 Relatieve ontwikkeling volume verschillende vervoerwijzen in GE-scenario



Noot: Luchtvaart LTO (landing and take-off) betreft alle starts en landingen.

2.5 Vervoersprognoses voor de EU-25

Waar Nederland in de WLO-scenario's uitgaat van verschillende maatschappelijke toekomstbeelden, beperkt DG TREN zich tot één scenario. Het scenario dat is opgesteld in opdracht van DG TREN laat eenzelfde ontwikkeling zien als voor Nederland wat transportvolumes betreft (zie Figuur 14 en Figuur 15). Lucht- en scheepvaart zijn hierin niet opgenomen. Het scenario is echter optimistischer over technologische ontwikkeling dan de WLO-scenario's en minder beleidsarm. Hieronder geven we een aantal kernpunten uit dit scenario weer. In paragraaf 3.2 en bijlage C gaan we dieper in op de aannames in dit scenario.

Tabel 3 Het DG TREN-scenario

DG TREN-scenario	
Economische groei 2% per jaar	Conform GE-scenario
Geen reductie transportvraag	Conform GE-scenario
Reductie koolstofintensiteit brandstoffen	Niet conform GE-scenario
Verbetering efficiency van motoren en industriële processen	Niet conform GE-scenario

Het personenverkeer zal naar verwachting minder snel groeien dan het vrachtverkeer. Dit komt onder andere omdat mensen een vast deel van hun tijd aan transport besteden³. De groei van het personenverkeer is volgens de scenario's in de toekomst lager dan het afgelopen decennium. Dit wordt veroorzaakt doordat het aanbod van autovoorzieningen in de toekomst niet meer zo snel zal toenemen en de groei in het actieve gedeelte van de bevolking afneemt (SCP, 2000). Ondanks deze lagere groei, neemt het aantal gereisde kilometers per capita met ongeveer 40% toe tussen 2000 en 2030. Deze analyse geldt zowel voor de EU als voor Nederland.

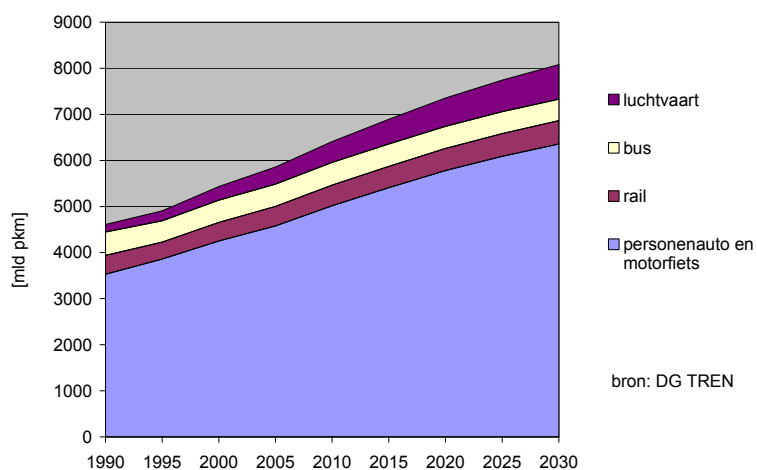
De toename van het vrachtautoverkeer voor de EU als geheel (EU-25) wordt geschat op 78% tussen 2000 en 2030. Dit betekent dat de groei de komende decennia door zal zetten, sterker nog zelfs dan de afgelopen 20 jaar. Luchtvaart zal waarschijnlijk het snelste groeien, gevolgd door vrachtauto's en personenauto's (Figuur 16).

Voor zowel personenvervoer als vrachtvervoer zijn op basis van de scenario's geen sterke veranderingen te verwachten ten opzichte van de huidige modal split. Vervoer over de weg blijft veruit het belangrijkste.

³ Dit wordt ook wel de wet van BREVER genoemd. De wet van Behoud van Reistijd En VERplaatsingen.

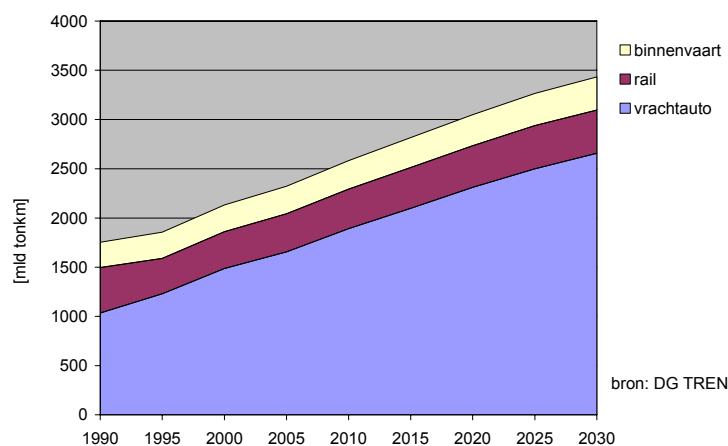


Figuur 14 Prognose vervoersprestatie personenvervoer in de EU-25

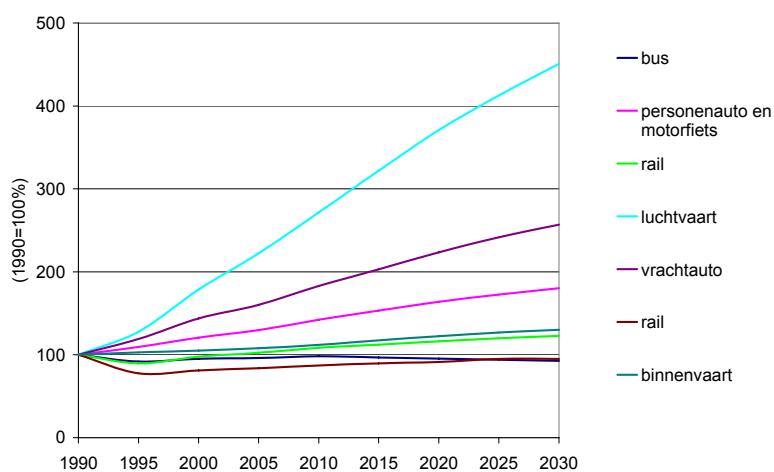


Noot: Luchtvaart betreft alle verkeer van en naar Europese luchthavens (zonder dubbeltellingen).

Figuur 15 Prognose vervoersprestatie goederenvervoer in de EU-25



Figuur 16 Relatieve ontwikkeling vervoerswijzen in de EU-25





3 Aandeel transport in totale energiegerelateerde CO₂-emissies

3.1 Historische ontwikkeling van CO₂-emissies in Nederland, de EU-15 en de wereld

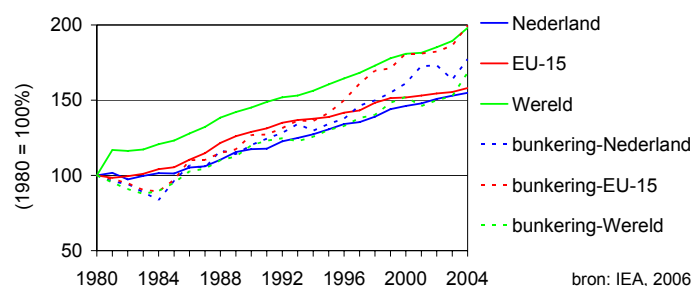
Figuur 18, Figuur 19 en Figuur 20 presenteren de energiegerelateerde CO₂-emissies per sector in Nederland, in de EU-15 en wereldwijd op basis van IEA-data. Niet-CO₂-emissies zijn niet opgenomen in deze figuren. Voor transport zijn deze overigens ook niet belangrijk, behalve voor luchtvaart (zie paragraaf 5.5). De relatieve ontwikkeling van de CO₂-emissies door de transportsector in Nederland, EU-15 en de wereld wordt vergeleken in Figuur 17. De brandstofbunkers zijn gealloceerd op basis van optie 3 uit textbox 1 (zie pag. 46).

In Nederland, Europa en wereldwijd zijn de CO₂-emissies van verkeer sterk gestegen tussen 1980 en 2005. In Nederland stegen emissies van transport in die periode met 55%. Deze stijging is ongeveer even groot als de toename van de verkeersvolumes over dezelfde tijdsperiode. Dit komt omdat voertuigen in Nederland gemiddeld niet wezenlijk zuiniger zijn geworden de afgelopen 20 jaar (zie ook Figuur 33).

Een andere belangrijke groeisector in Nederland en wereldwijd is de energiesector. Europa-breed blijven de emissies van deze sector nagenoeg constant. Opvallend is het sterk stijgende aandeel van internationale bunkerbrandstoffen voor Nederland. Dit zijn de brandstoffen die getankt worden door de lucht- en zeescheepvaart op Nederlands grondgebied. Het is duidelijk dat in Nederland en Europa de internationale lucht- en scheepvaart sterk groeit, terwijl wereldwijd de opkomst van mobiliteit in landen als China en India voor een sterkere groei van transport over land zorgt.

Het aandeel van transport in de totale CO₂-emissies groeit. In Nederland is het aandeel van transport in de totale CO₂-emissies echter lager dan in Europa. Dit heeft te maken met het beperkte aandeel kernenergie en waterkracht in de Nederlandse energievoorziening. In landen als Zweden en Frankrijk zijn door grootschalige inzet van deze energiebronnen de emissies van de energiesector relatief veel lager. Ondanks dat Nederland aan de Kyoto-doelstelling voor 2008-2012 lijkt te gaan voldoen, nemen de CO₂-emissies niet af. Nederland realiseert de afgesproken reductie grotendeels door het reduceren van emissies van overige broeikasgassen en door JI en CDM⁴. Wereldwijd groeit de totale CO₂-uitstoot van transport sterk.

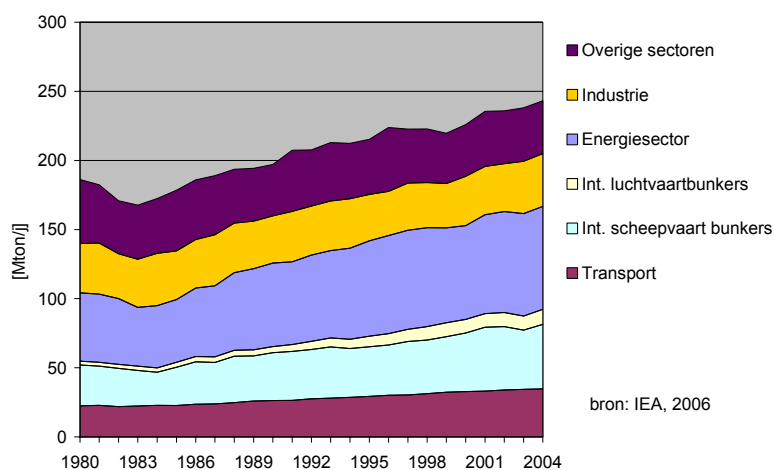
Figuur 17 Relatieve ontwikkeling van CO₂-emissies van verkeer (zonder niet CO₂-broeikasgassen)



⁴ Zie Bijlage A.

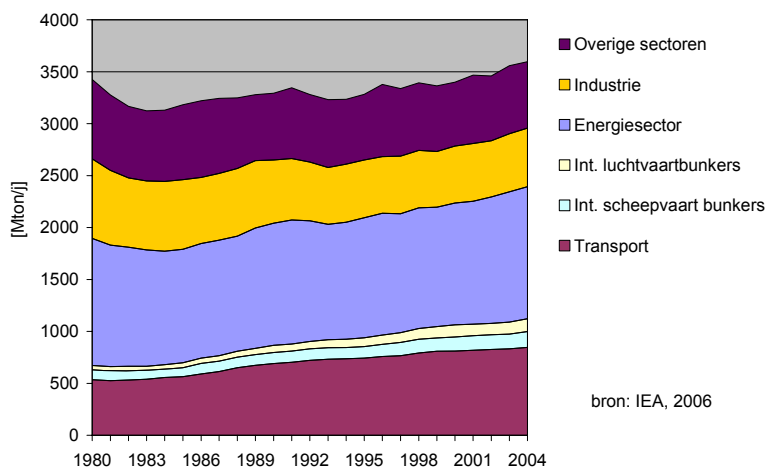


Figuur 18 Nederland: CO₂-emissies per sector



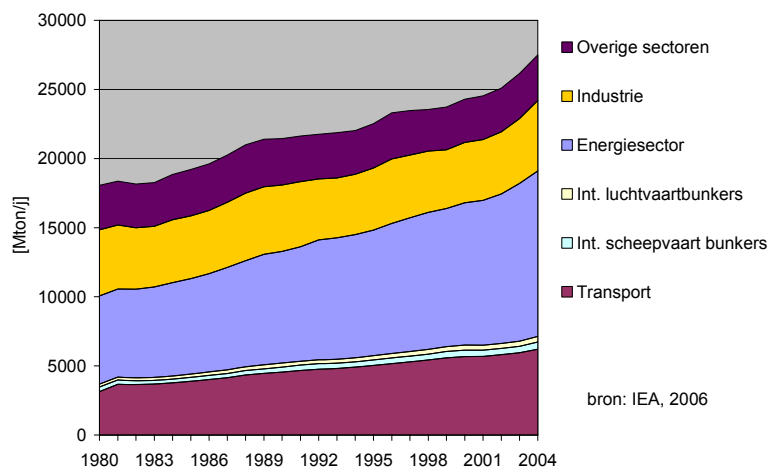
Noot: De energiesector omvat ook de productie van brandstoffen.

Figuur 19 EU-15: CO₂-emissies per sector



Noot: De energiesector omvat ook de productie van brandstoffen.

Figuur 20 Wereld: CO₂-emissies per sector



Noot: De energiesector omvat ook de productie van brandstoffen.

3.2 Prognoses toekomstige CO₂-emissies: Nederland, de EU-25 en de wereld

Zoals te zien is in Figuur 22 is het de verwachting dat de CO₂-emissies van het Nederlandse verkeer in de meeste scenario's verder doorstijgen in de toekomst, bij een trendmatige voortzetting van het huidige beleid. Alleen in het RC-scenario vindt stabilisatie plaats. Omdat ook de CO₂-emissies van andere sectoren blijven stijgen, neemt het aandeel van transport in de CO₂-emissies tussen 2004, 2020 en 2040 niet noemenswaardig toe (zie Figuur 21).

Het Europese referentiescenario van DG TREN is optimistischer over autonome technologische ontwikkeling dan de Nederlandse WLO scenario's. Het veronderstelt net als het WLO GE scenario een jaarlijkse groei van het BBP met 2% en vergelijkbare volumegroei, maar maakt de aanname dat door middel van (autonome) technologische ontwikkeling de energie-intensiteit van de samenleving jaarlijks vermindert⁵. Ten aanzien van transport gaat dit scenario's er van uit, dat de effecten van het 'ACEA convenant'⁶ in de toekomst doorwerken⁷. WLO gaat hiervan slechts uit in het RC- en TM-scenario.

Wereldwijd blijven de CO₂-emissies sterk stijgen in de komende decennia (zie Figuur 24). In westerse landen blijft de vraag naar passagierstransport per capita stijgen, en de transportintensiteit⁸ van de economie daalt naar verwachting niet wezenlijk. Dit betekent dat bij economische groei de uitstoot van CO₂ zal blijven stijgen. Daarbij komt de opkomst van ontwikkelende landen zoals China, India en Brazilië.

De vraag naar olie voor transport zal in niet-OECD-landen drie maal sneller stijgen dan in de OECD landen tussen 2004 en 2030. De grootste toename van de CO₂-emissies van transport zal in niet-OECD-landen plaatsvinden (Cozzi, 2006).

⁵ Zo maakt dit scenario aannames over een toename van WKK (warmte-krachtkoppeling), een aandeel van 28% hernieuwbaar in de energievoorziening in 2030 en 20 keer zoveel vermogen aan windturbines in 2030 dan in 2000.

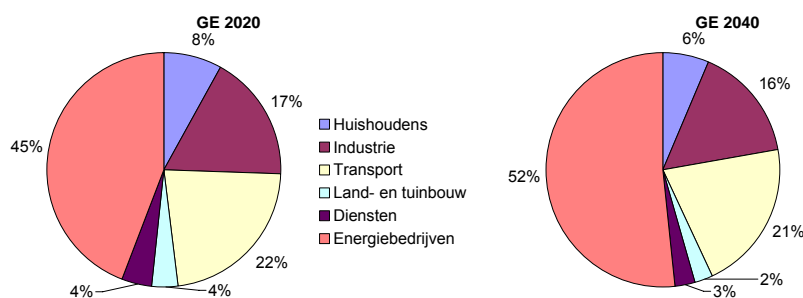
⁶ Vrijwillige afspraken tussen EU en associaties van autoproducenten ACEA, JAMA en KAMA om de verkoopgemiddelde CO₂-emissie van nieuwe voertuigen te reduceren tot 140 g/km in 2008 (ACEA) of 2009 (JAMA, KAMA).

⁷ Dit betekent dat als auto's eenmaal zuinig zijn dat emissies niet meer toenemen, ook niet zonder beleid.

⁸ Tonkm/EUR BBP.



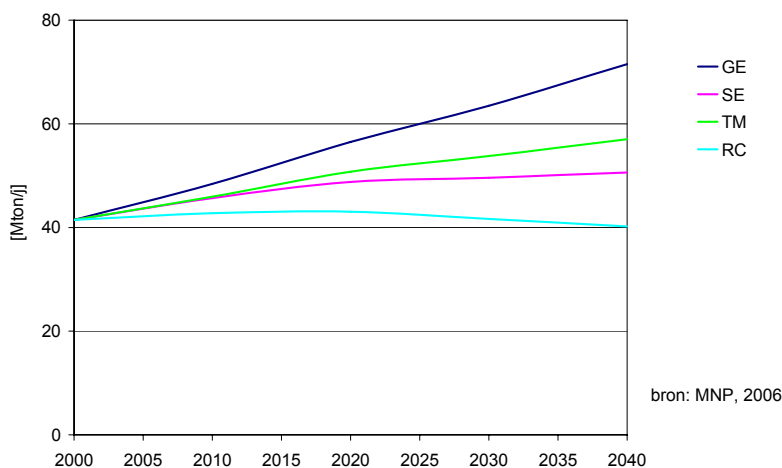
Figuur 21 Aandeel transport in de totale CO₂-emissies in Nederland (GE scenario)



Bron: MNP, 2006a.

Noot: Overige broeikasgasemissies niet opgenomen. Luchtvaart (LTO) en Zeescheepvaart op het Nationaal Continentaal Plat (NCP) wel opgenomen.

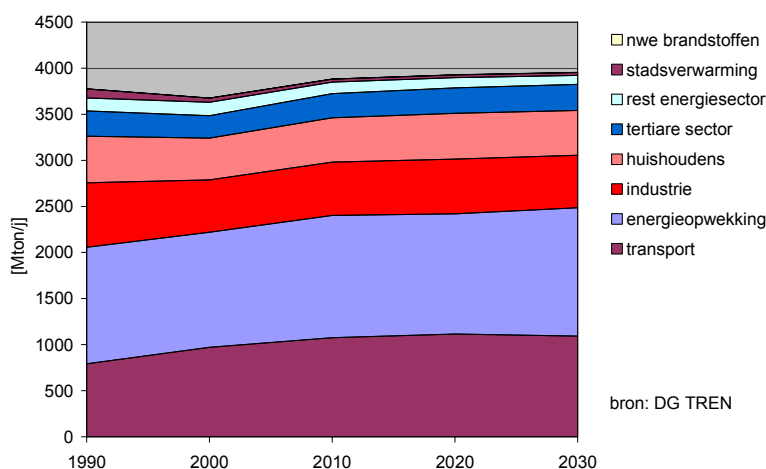
Figuur 22 CO₂-emissies van de totale verkeerssector in Nederland



bron: MNP, 2006

Noot: Inclusief luchtvaart LTO en zeescheepvaart op het NCP.

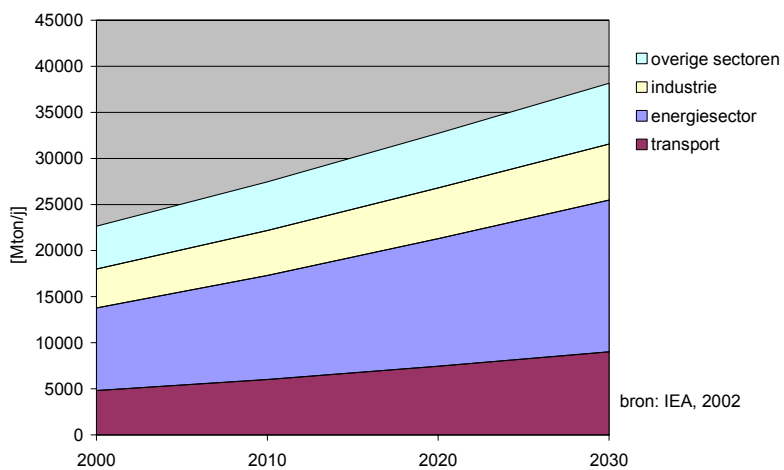
Figuur 23 Prognose van CO₂-emissies per sector in de EU-25



bron: DG TREN

Noot: Luchtvaart (allocatie op basis van brandstofverkoop in EU-25) is opgenomen, scheepvaart-bunkers niet opgenomen.

Figuur 24 Prognose van wereldwijde CO₂-emissies per sector



Noot: IEA-scenario is beleidsarm, economische groei 3% op wereldschaal. Inclusief lucht- en scheepvaart.



4 CO₂-emissies en energiegebruik per modaliteit in Nederland

4.1 Historische ontwikkeling en projecties van het energiegebruik van verschillende vervoersmodaliteiten in Nederland

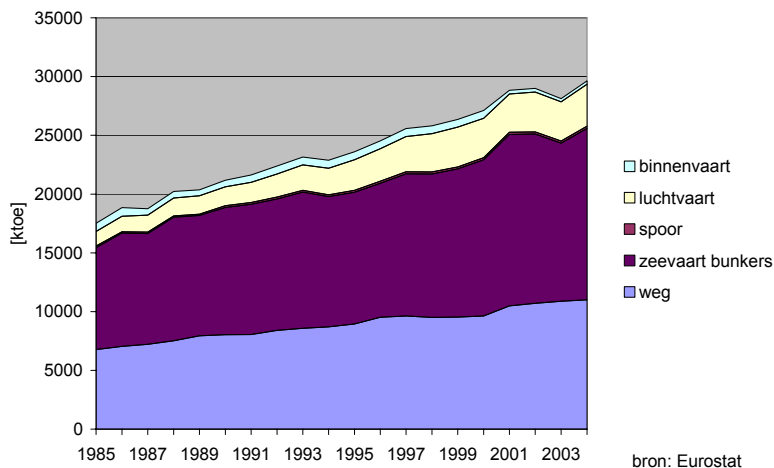
Het energiegebruik van de Nederlandse transportsector is sinds 1985 met 70% toegenomen, wanneer de gebunkerde brandstof op luchthavens en in zeehavens wordt meegenomen. Naast wegtransport is hier de hoogste groei opgetreden (Figuur 25). In deze figuur is lucht- en zeevaart toegedeeld op basis van de plaats van brandstofinname, optie 3 in textbox 1 (pag. 46).

Wanneer we naar het wegtransport kijken neemt de personenauto daar verreweg het grootste deel in, gezamenlijk 63%. Opvallend is het aandeel van bestelauto's (Figuur 26).

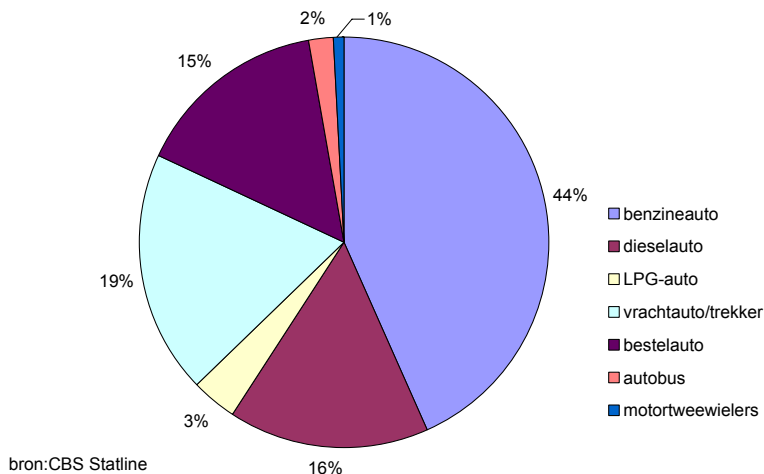
In de toekomst blijft het energiegebruik van de transportsector toenemen (Figuur 27), vanwege de toename van de verkeersvolumes. Bij het uitblijven van efficiëntieverbeteringen en gebruik van dezelfde brandstoffen vertoont het toekomstige verbruik van energie eenzelfde patroon als de uitstoot van CO₂. Figuur 27 en Figuur 29 laten daarom een vergelijkbaar verloop zien.



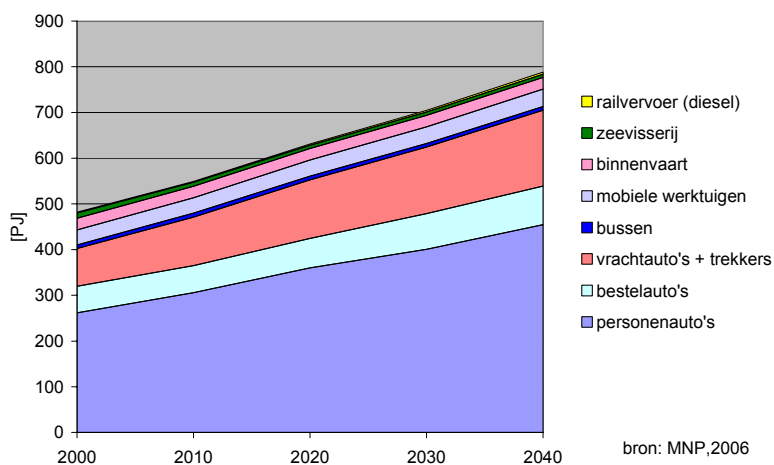
Figuur 25 Historisch energiegebruik voor transport in Nederland



Figuur 26 Aandeel van vervoermiddelen in totaal energiegebruik wegverkeer (PJ, 2004)



Figuur 27 Energiegebruik per vervoerswijze (GE-scenario)



4.2 Historische ontwikkeling en projecties van de CO₂-emissies van verschillende vervoersmodaliteiten in Nederland

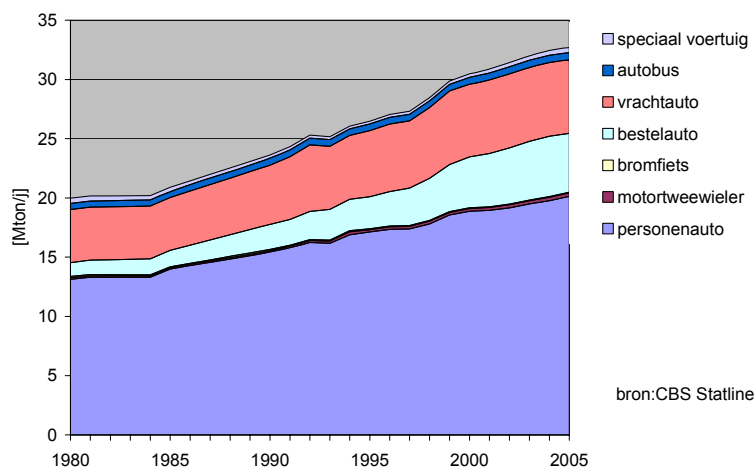
Personenvervoer heeft het grootste aandeel in de totale CO₂-emissies als gevolg van transport in Nederland (zie Figuur 28). De personenauto is verantwoordelijk voor 62% van alle vervoersgerelateerde CO₂-emissies in 2004, exclusief lucht- en scheepvaart. De categorie bestelauto's is sterk gegroeid in de laatste jaren.

In de toekomst blijven de emissies van het verkeer groeien in het beleidsarme WLO GE scenario (zie Figuur 29 en Figuur 30). Dit scenario gaat er van uit dat voertuigen netto niet zuiniger worden. De CO₂-emissies van vrachtauto's stijgen in dit scenario met 100% tussen 2000 en 2040. Deze sterke groei komt voort uit het feit dat het vrachtvolume sterk gerelateerd is aan de economische groei. Na 2020 vindt er in het GE-scenario wel een lichte ont koppeling van het BBP en de CO₂-emissies van het goederenvervoer plaats.

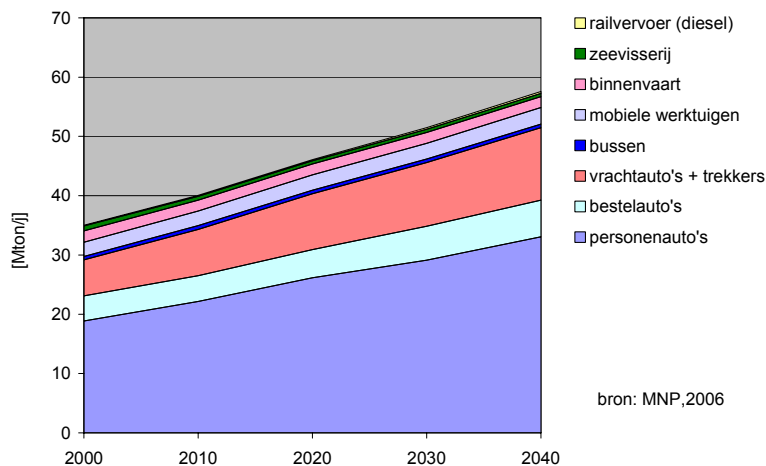
In het SE-scenario vindt een sterkere ont koppeling plaats, o.a. als gevolg van verondersteld Europees beleid m.b.t. CO₂-emissies van voertuigen (Figuur 30). Maar zelfs in dat scenario stijgen de CO₂-emissies van het goederenvervoer tussen 2000 en 2040 nog met ruim 50%.



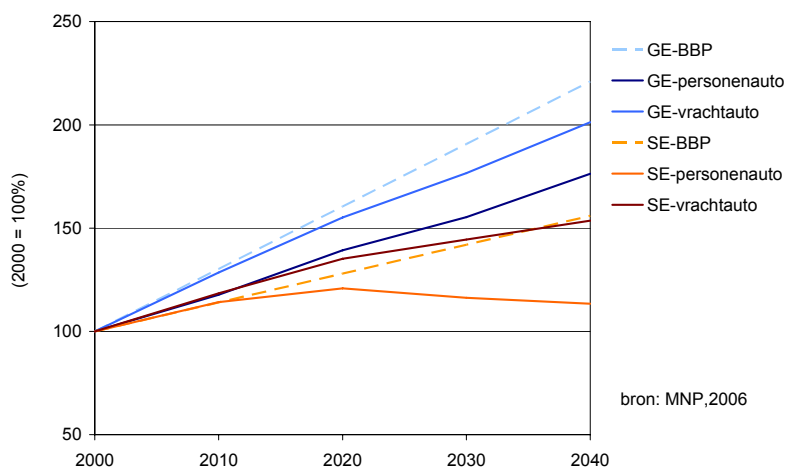
Figuur 28 CO₂-emissies per vervoerwijze



Figuur 29 Prognose van CO₂-emissies per vervoerwijze (GE-scenario)



Figuur 30 Prognose relatieve ontwikkeling BBP en CO₂-emissies

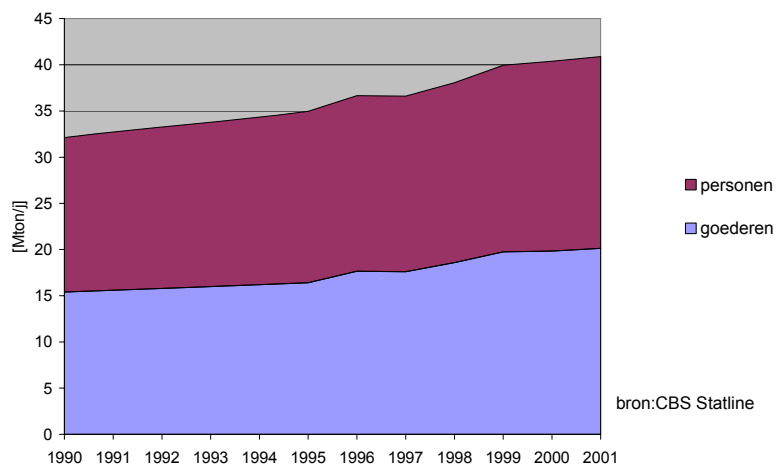


4.3 Verhouding tussen personen- en goederenvervoer

Wanneer alle modaliteiten worden meegeteld is het aandeel van goederenvervoer en personenvervoer in de totale CO₂-emissies ongeveer gelijk (Figuur 31). In de toekomst gaat dit ook niet wezenlijk veranderen. Beide sectoren groeien ongeveer even snel (Figuur 32).

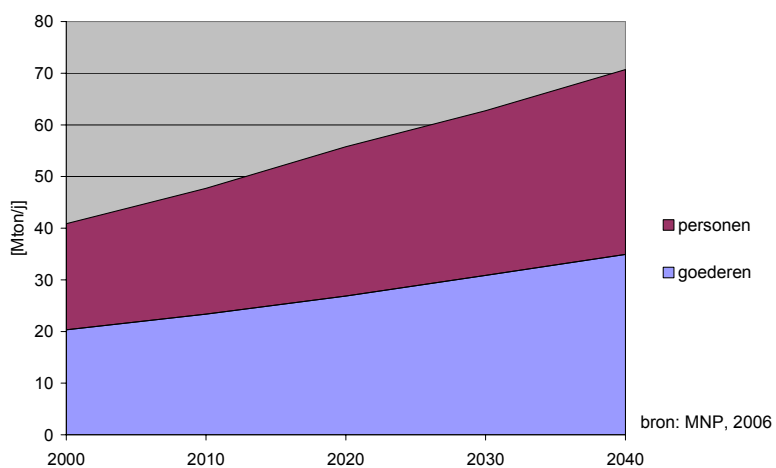


Figuur 31 Historische verdeling CO₂-emissies over goederen- en personenvervoer



Noot: Luchtvaart LTO en zeevaart op NCP opgenomen en de vervoerswijzen uit Figuur 28.
Bestelauto's = goederen.

Figuur 32 Toekomstige verdeling CO₂-emissies over goederen- en personenvervoer (GE-scenario)



Noot: Luchtvaart LTO en zeevaart op NCP opgenomen en de vervoerswijzen uit Figuur 29.
Bestelauto's = goederen.

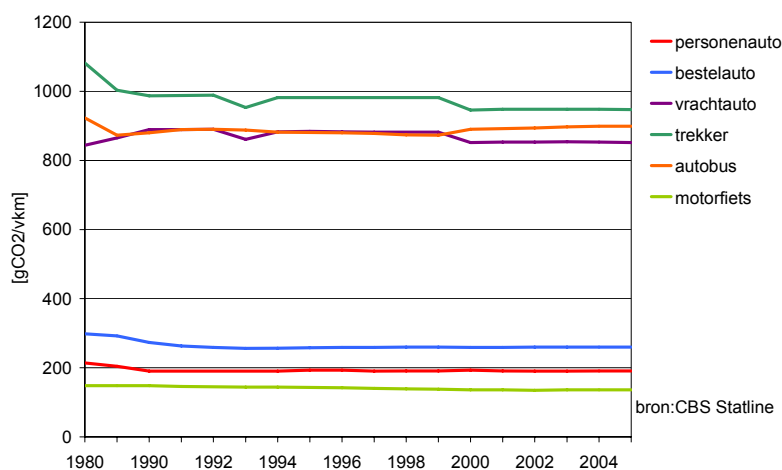
4.4 Emissiefactoren per modaliteit

Figuur 33 geeft aan dat voertuigen in de praktijk in Nederland gemiddeld niet significant zuiniger zijn geworden in de laatste 20 jaar. Dit heeft onder andere te maken met een toename van het gewicht en comfortverhogende accessoires. Op personenauto's na is er ook geen specifiek beleid gevoerd om voertuigen zuiniger te maken. Ook in de toekomst zullen voertuigen niet zuiniger worden, zonder dat hiervoor specifiek aanvullend beleid voor wordt gemaakt (Figuur 35 en Figuur 34). Dat betekent dat met de geprojecteerde volumegroei de emissies gaan toenemen, zoals afgebeeld in Figuur 29 en Figuur 30. Voor de andere modaliteiten is in de WLO-scenario's verondersteld dat het brandstofverbruik in de toekomst niet verandert.

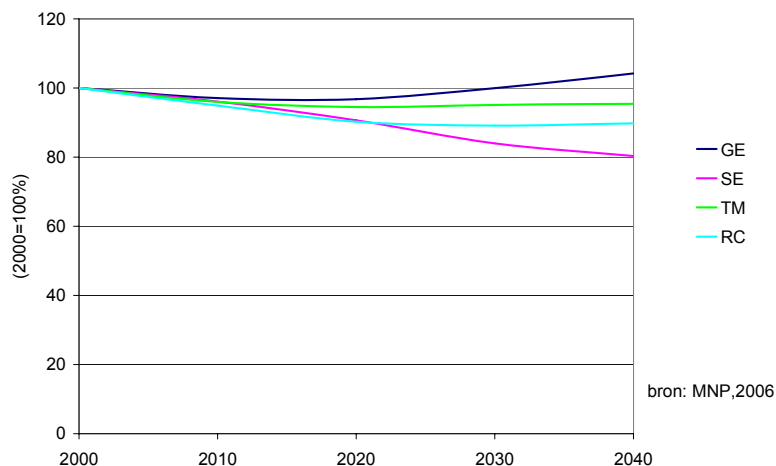
In hoofdstuk 6 zijn emissiefactoren per tonkilometer en passagierkilometer opgenomen.



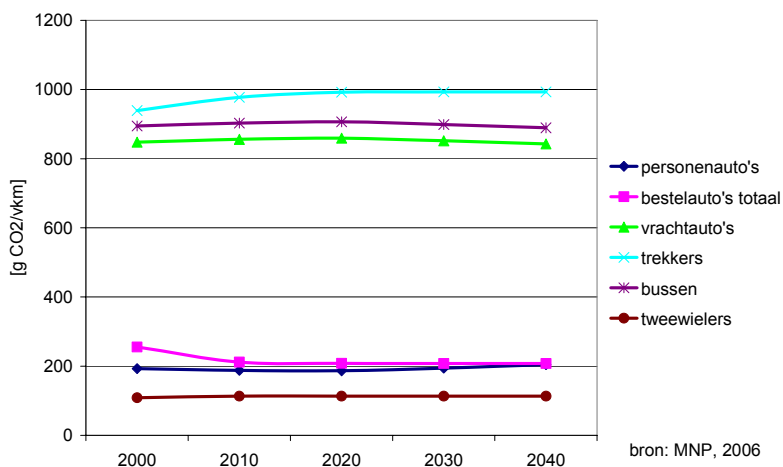
Figuur 33 Gemiddelde praktijk CO₂-emissiefactor per vervoerwijze



Figuur 34 Gemiddelde efficiëntieverbetering wegverkeer (vracht+personen) per WLO-scenario (op basis van CO₂-emissies in gram per voertuigkm)



Figuur 35 Gemiddelde CO₂-emissiefactor per vervoerswijze in GE-scenario (incl. eventuele effecten van verschuivingen tussen voertuig(grootte)klassen binnen een voertuigcategorie)





5 Lucht- en scheepvaart

5.1 Vervoersprestatie van luchtvaart

Het aantal reizigerskilometers per vliegtuig is verdubbeld sinds 1990 in de EU-15 (Figuur 36)⁹. Oorzaken hiervan zijn de toegenomen inkomens en de lagere reële prijzen voor vliegtickets door efficiencyverbeteringen in de luchtvaartsector. Voor Nederland is de groei nog sterker geweest dan voor de EU-15 als totaal, duidend op de sterke positie van Schiphol als Europese Luchthaven. Het vervoer van personen door de lucht is binnen Europa toegenomen met een factor 9 tussen 1970 en 2000. De SARS-epidemie en terroristische aanslagen in de Verenigde Staten laten een kleine neergang zien in de periode 2000/2001.

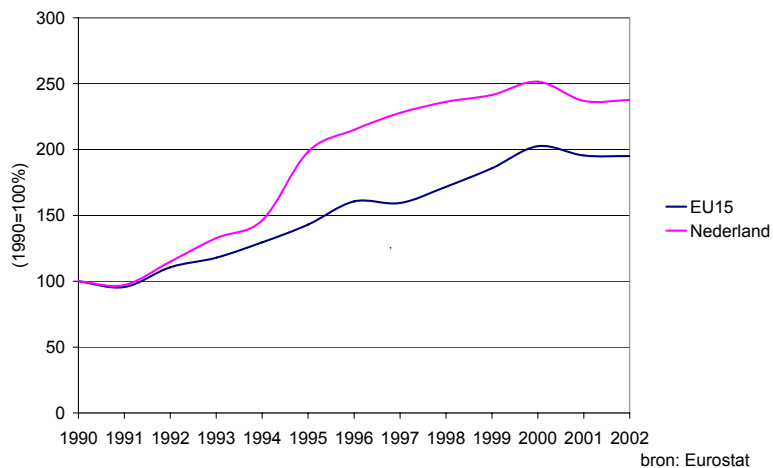
Het aandeel van luchtvaart in de totale vervoersprestatie in Nederland is 29% (Figuur 37). In de EU-15 is dit aandeel veel kleiner, ongeveer 12%. Dit kan verklaard worden uit de belangrijke positie van Schiphol in het intercontinentale luchtvaartverkeer.

Het aandeel van luchtvracht in het vrachtverkeer is erg gering. In 2002 was dit aandeel 1% in de EU-15.

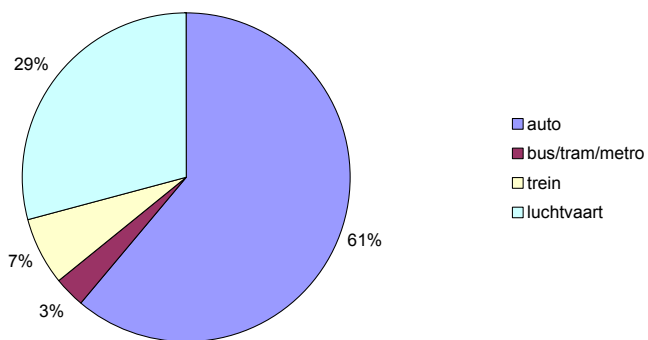
⁹ Dit betreft alle extra-EU-vluchten die vanaf Europese luchthavens vertrekken of aankomen en alle vetrekende intra-EU-vluchten vanaf EU-luchthavens.



Figuur 36 Reizigerskilometers in NL en EU-15



Figuur 37 Aandeel luchtvaart in vervoersprestatie Nederland (2002, op basis van pkm)



Noot: Alle uit Nederland vertrekkende vluchten aan Nederland toegerekend. Figuur is gelijk aan Figuur 3.

5.2 Vervoersprestatie van zeescheepvaart

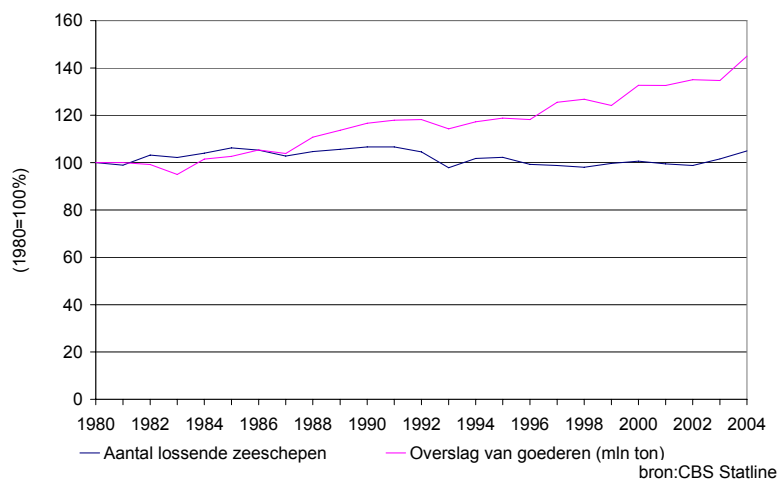
Het aantal verladen tonnen in de Nederlandse zeehavens is sinds 1980 toegenomen met 45%. Het aantal schepen dat de Nederlandse havens aandoet is echter constant gebleven. De scheepsgrootte is wel toegenomen. Deze ontwikkeling is weergegeven in Figuur 38. In Europa als geheel is de overslag van goederen sterker toegenomen dan in Nederland (Figuur 40). Dit betekent dat andere zeehavens in Europa sterker gegroeid zijn dan Rotterdam.

In Figuur 39 is de verwachting voor de toekomstige overslag van lading in Nederlandse zeehavens weergegeven volgens de verschillende WLO-scenario's. Deze is sterk afhankelijk van de internationale ontwikkelingen. Wanneer de samenwerking internationaal sterker wordt, neemt het transport van goederen over zee sterk toe. Containeroverslag is de sterkst groeiende markt in de zeescheepvaart, en zelfs bijna volledig verantwoordelijk voor de groei.

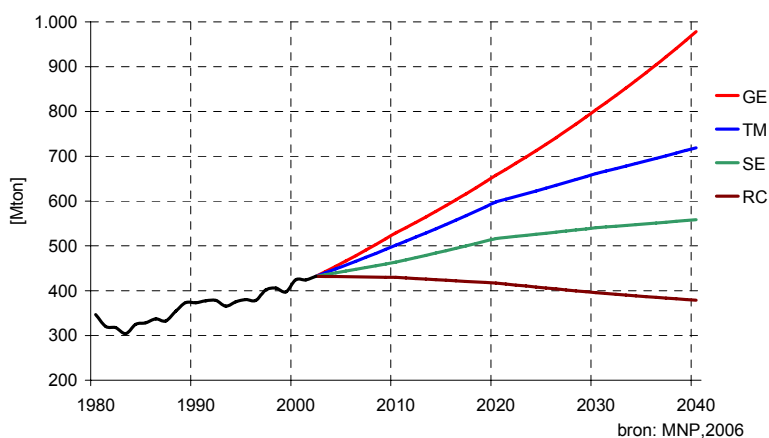
Prognoses voor zeevaart worden gemaakt op basis van verwachte BBP groei. De toekomstige trends zijn daarmee vergelijkbaar met de historische trends.



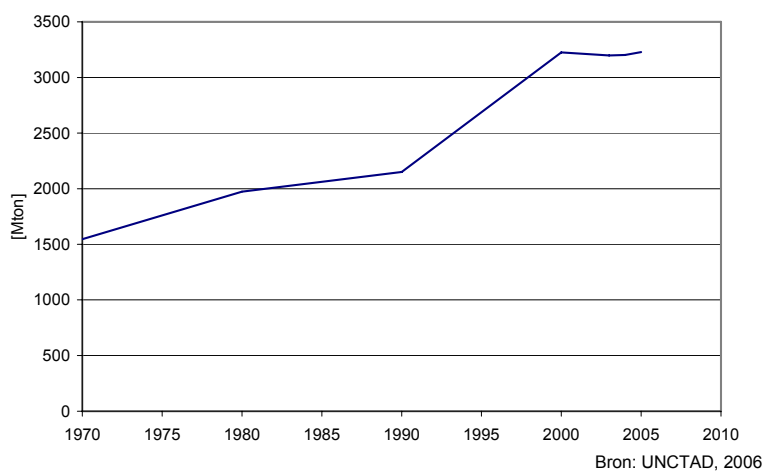
Figuur 38 Overslag van goederen in Nederlandse zeehavens en gemiddelde scheepsgrootte in Nederlandse zeehavens



Figuur 39 Overslag in Nederlandse zeehavens in de WLO-scenario's



Figuur 40 Overslag van goederen in Europese zeehavens



Noot: Europa staat voor EU-25 + Zwitserland, Noorwegen, Monaco, Israël en Turkije.

5.3 CO₂-emissies van lucht- en scheepvaart: allocatie

Over de toerekening van emissies van internationale lucht- en scheepvaart is internationaal veel discussie. Nederland ondervindt voordeel van de doorvoer van lading naar het Europese achterland, maar dit transport heeft toch vooral ook een economische functie voor de landen waarin de getransporteerde goederen worden geproduceerd en gebruikt. Tegelijkertijd heeft Nederland slechts beperkte mogelijkheden om de emissies van internationaal transport te reduceren.

De emissies van internationale lucht- en scheepvaart vallen op dit moment nog buiten internationale afspraken over het terugdringen van luchtverontreinigende emissies en CO₂-emissies. Eén van de redenen hiervan is dat er nog geen overeenstemming is bereikt over het toewijzen van de emissies aan landen of partijen. Door de UNFCCC zijn hiervoor 8 basale mogelijkheden aangewezen.

Textbox 1: Opties voor allocatie van emissies lucht- en scheepvaart	
Optie 1	Geen allocatie.
Optie 2	Allocatie van wereldwijde bunkerbrandstofverkoop en daaraan gekoppelde emissie op basis van de rato van nationale emissies.
Optie 3	Allocatie op basis van land van brandstofverkoop.
Optie 4	Allocatie op basis van het land van herkomst van de vervoerder, land van herkomst verlader, of het land van registratie van schip of vliegtuig.
Optie 5	Allocatie op basis van het land van vertrek of aankomst van schip of vliegtuig. Emissies gerelateerd aan de reis worden verdeeld over land van vertrek en aankomst.
Optie 6	Allocatie op basis van de herkomst van passagiers of lading. Emissies gerelateerd aan de reis worden verdeeld over land van vertrek en aankomst.
Optie 7	Allocatie op basis van de nationaliteit van passagiers of van het land van herkomst van de eigenaar van de lading.
Optie 8	Allocatie op basis van emissie en brandstofgebruik in nationaal luchtruim of territoriale wateren. Transport over internationale wateren en door internationaal luchtruim is hierbij nog niet gealloceerd.

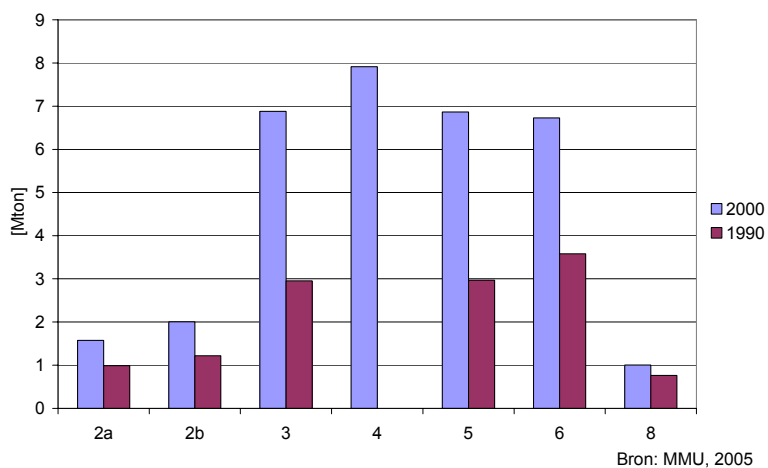
Optie 2 wordt niet eenduidig geïnterpreteerd. De nationale (met uitzondering van emissies uit int. bunkers) emissies kunnen gezien worden als alle CO₂-emissies (a) of als alle emissies die onder het Kyoto-protocol moeten worden gerapporteerd (b). Daarom presenteren we beide in de onderstaande figuren.

In Figuur 41 en Figuur 42 geven we de emissies weer die voor de luchtvaart aan Nederland en de EU-25 worden toegewezen op basis van de verschillende allocatiemethoden. Ongeacht de allocatiemethode blijkt duidelijk dat de CO₂-emissies van luchtvaart sterk zijn toegenomen tussen 1990 en 2000.

Voor scheepvaart zijn de historische emissies weergegeven in Figuur 17, Figuur 18 en Figuur 19 (beide allocatieoptie 3) en Figuur 45.

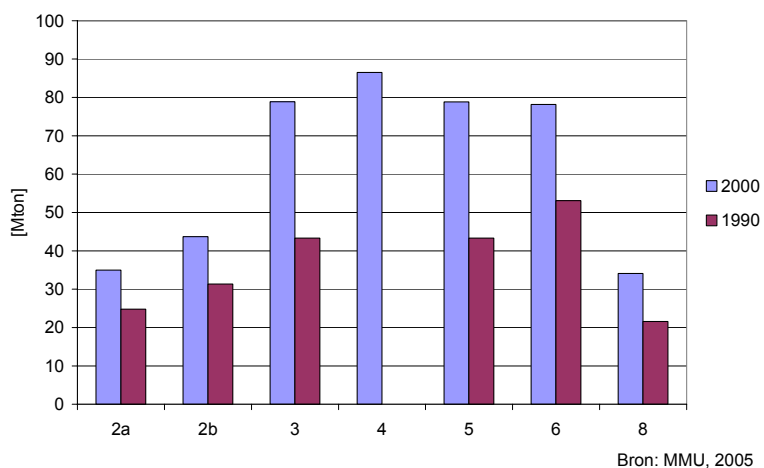


Figuur 41 CO₂-emissies van internationale luchtvaart per toedelingsoptie voor Nederland



Noot: Voor allocatiemethode 4 is voor 1990 geen data beschikbaar.

Figuur 42 CO₂-emissies van internationale luchtvaart per toedelingsoptie voor de EU-25



Noot: Voor allocatiemethode 4 is voor 1990 geen data beschikbaar.

5.4 CO₂-emissieprojecties voor lucht- en scheepvaart

De emissies van de internationale luchtvaart nemen sterk toe in de volgende decennia. Figuur 43 en Figuur 44 geven voor drie verschillende toerekeningsopties (3, 5 en 6) de prognoses weer voor EU-25 en Nederland. Wanneer gekozen wordt voor een allocatie op basis van brandstofverbruik c.q. emissies in nationaal luchtruim of territoriale wateren (optie 8) dan zien we dat de verwachte groei van Nederland toegewezen CO₂-emissies veel minder sterk is (zie Figuur 43) omdat de meeste vluchten vanuit Nederland grensoverschrijdend zijn. Voor EU-25 geldt dat door het grote aandeel intra-EU vluchten het verschil tussen optie 8 en opties 3, 5 en 6 kleiner is dan voor Nederland (zie Figuur 44).

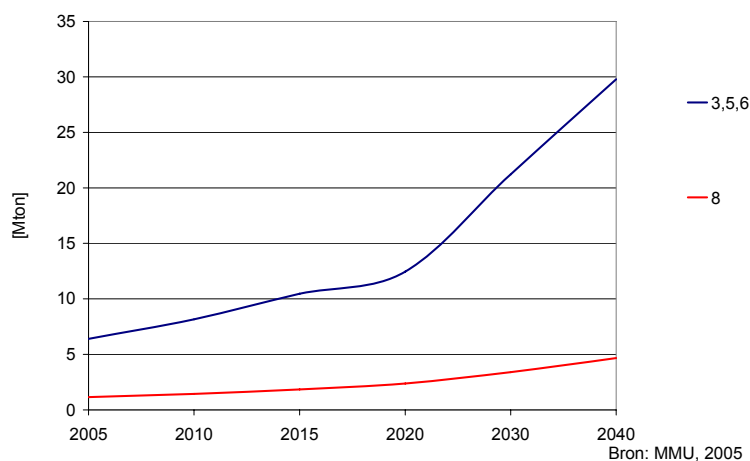
Voor Nederland zijn de verschillen tussen allocatiemethode 3, 5 en 6 wat luchtvaart betreft beperkt. Optie 6 is echter niet helemaal volgens de definitie uitgewerkt. Er is alleen naar individuele vluchten gekeken, waarbij overstappen is genegeerd vanwege dataproblematiek. Dit betekent dat voor Nederland de emissies lager zouden zijn indien met overstappen wel rekening was gehouden (MMU, 2005).

Ook de emissies van scheepvaart gaan sterk groeien. Waar gedurende de jaren negentig de CO₂-emissies van scheepvaart constant gebleven zijn, gaan ze in de toekomst sterk groeien volgens scenario's ontwikkeld door MNP in het kader van een mogelijke opname van scheepvaart in het post-Kyoto klimaatbeleid (MNP, 2006b). In Figuur 45 zijn de emissies van de internationale scheepvaart afgebeeld, volgens allocatieoptie 6. De groei in CO₂-emissies wordt nagenoeg geheel veroorzaakt door een sterke toename in het vervoer van containers. Het high efficiency scenario gaat uit van een 25% energie-efficiencyverbetering tussen 2000 en 2050. Overigens gaat het hier om een lage schatting. Emissies van scheepvaart kunnen, zoals hier, top-down worden geschat op basis van bunkerbrandstofverkoop, of bottom-up op basis van scheepsactiviteit. De laatste methode geeft een ruwweg 2 keer zo hoge CO₂-emissie.

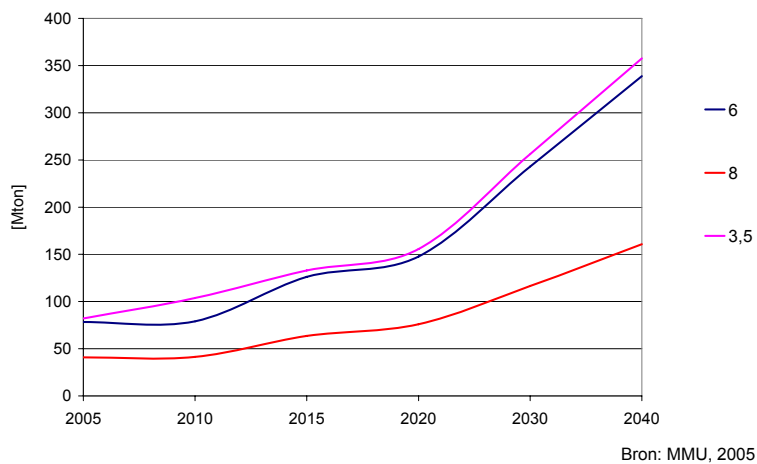
Wanneer we de emissies van internationale lucht- en scheepvaart in de EU in beschouwing nemen, ligt de ordegrrootte van het aandeel van lucht- en scheepvaart in de totale emissies van transport op 25% (Figuur 19), op basis van bunkerbrandstofverkoop (allocatieoptie 3). Op basis van allocatieoptie 6 is het aandeel van internationale lucht- en scheepvaart ruwweg 22% in 2005. Voor Nederland levert allocatieoptie 3 waarschijnlijk een groter aandeel lucht- en scheepvaart in de totale transportemissies op dan allocatieoptie 6, omdat Rotterdam een belangrijke bunkerhaven is.



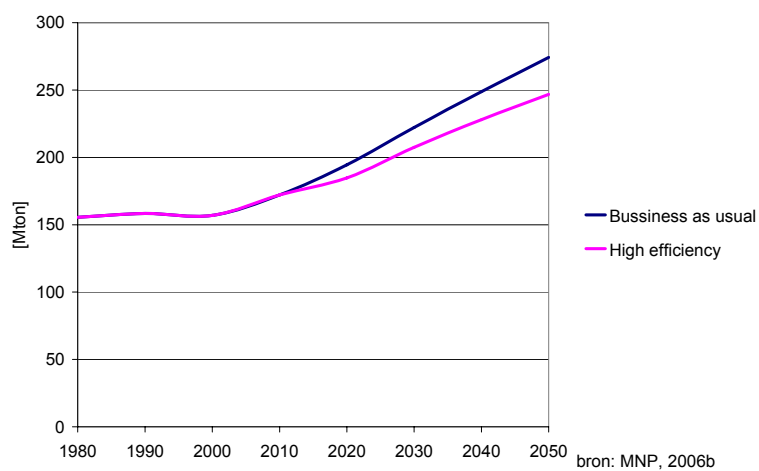
Figuur 43 Emissies van de internationale luchtvaart voor Nederland per allocatieoptie



Figuur 44 Emissies van de internationale luchtvaart voor EU-25 per allocatieoptie



Figuur 45 Emissies van Europese scheepvaart 1980-2050



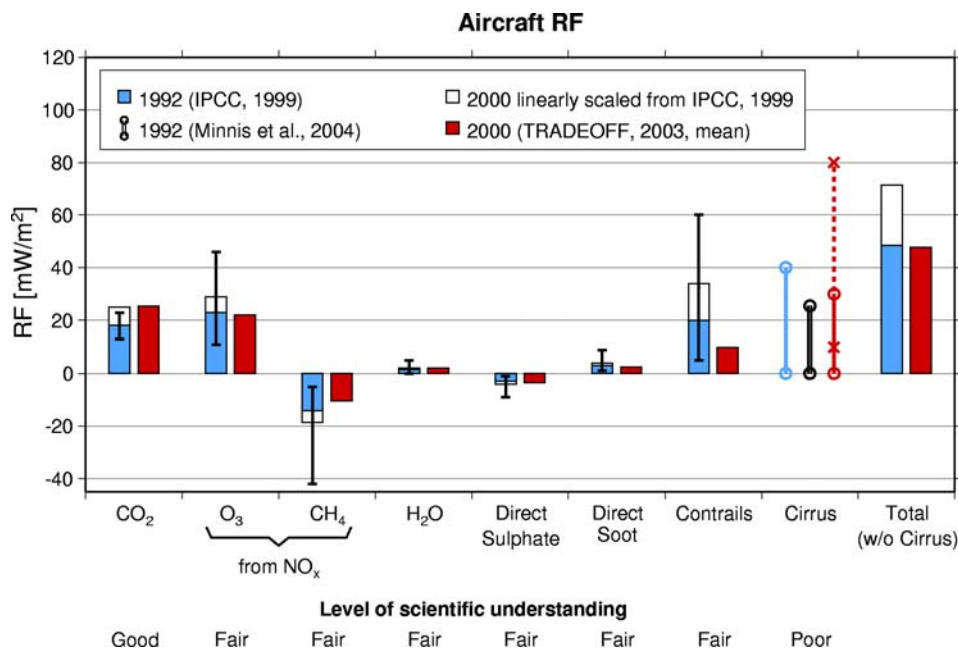
Noot: BAU gaat uit van economische groei, waarbij de relatie tussen de groei van de economie en scheepvaart wordt verondersteld hetzelfde te blijven.

5.5 Niet-CO₂-klimaateffecten van luchtvaart

Het klimaateffect van luchtvaart komt niet alleen voort uit de uitstoot van broeikasgassen, maar ook uit indirecte effecten van niet-broeikasgassen en andere effecten, zoals condensatiestrepen en cirrus-bewolking (IPCC, 1999). Volgens IPCC (1999) was de totale *radiative forcing* (een maat voor het klimaateffect) in 1992 2,7 maal zo groot als de *radiative forcing* van de CO₂-uitstoot van de luchtvaart, met een range tussen 1,9 en 4,0.

Recente berekeningen laten zien dat (IPCC, 1999) de *radiative forcing* van niet-CO₂-effecten waarschijnlijk heeft overschat. Volgens (Sausen, 2005) is in 2000 de totale *radiative forcing* van de luchtvaart ongeveer 2 keer zo groot is als de *radiative forcing* van de CO₂-uitstoot van luchtvaart (zie Figuur 46). Cirrus-bewolking is niet in de figuur opgenomen.

Figuur 46 CO₂- en niet-CO₂-gerelateerde klimaateffecten volgens (Sausen, 2005)



6 CO₂-emissies tijdens korte en lange ritten

6.1 CO₂-emissie van korte en lange ritten: personenvervoer

Korte ritten verschillen van lange ritten op verschillende punten:

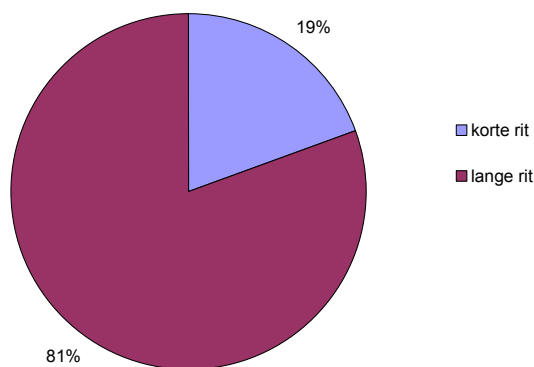
- Soort vervoermiddel: Fietsen en lopen zijn in de stad opties. Voor zeer grote afstanden is alleen het vliegtuig een reële optie. Voor middellange en lange verplaatsingen is de keus tussen auto, OV en vliegtuig.
- Bezettinggraad: Bij reizen over grote afstanden zijn voertuigen vaak beter bezet.

Over het algemeen gaan korte autoritten gepaard met een hoger brandstofgebruik per kilometer dan lange autoritten. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door het dynamische karakter van een stadsrit en het grotere aandeel koude starts, welke beide gepaard gaan met een hoger brandstofverbruik. Een andere factor is de bezettingsgraad. Mensen reizen over grote afstanden vaak samen. In de stad zijn de verschillen groter dan op lange afstanden. In de stad zijn lopen en fietsen de meest milieuvriendelijke vervoerswijzen, gevolgd door het openbaar vervoer per tram en metro. De auto heeft in de stad de hoogste CO₂-emissies. Op lange afstanden is het verschil tussen de auto en andere vervoerswijzen kleiner. Op lange ritten reizen is de bezettingsgraad van auto's hoger, en de alternatieven hoge snelheidstrein (HST) en het vliegtuig verbruiken relatief veel energie. Vliegen gaat gepaard met de hoogste CO₂-emissies. Reizen per HST produceert zowel op korte als op lange afstanden minder CO₂ dan reizen per vliegtuig.

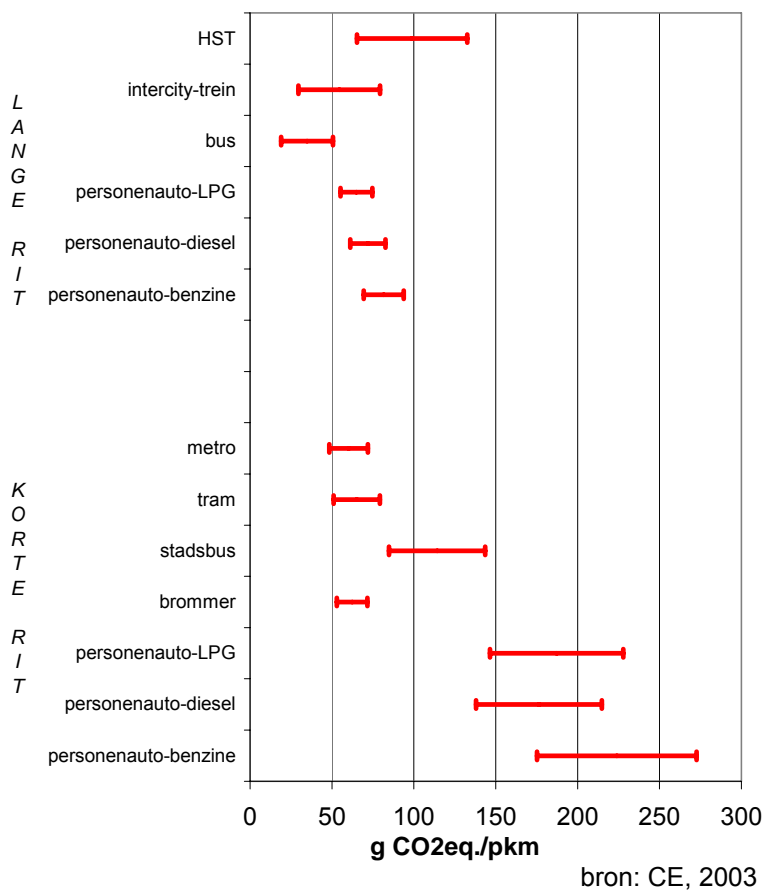
In het geval van luchtvaart (Figuur 49) is rekening gehouden met de niet-CO₂-klimaateffecten zoals genoemd in paragraaf 5.5 door de directe CO₂-emissies te vermenigvuldigen met een factor 2,7 (CE 2003). Voor luchtvaart is de verhouding in de CO₂-emissies intra-Europees/extra-Europees naar schatting ongeveer 35/65 in de EU-15, alle vertrekkende en aankomende vluchten meegerekend (zonder dubbeltellingen).

Uit het interdepartementale project 'korte ritten' is aan het begin van de jaren negentig gebleken dat er jaarlijks ongeveer 3 miljard ritten korter dan 7,5 kilometer worden gemaakt in Nederland. Het aandeel van deze ritten in de totale CO₂-emissie van personenauto's is ongeveer 19%, zie Figuur 47.

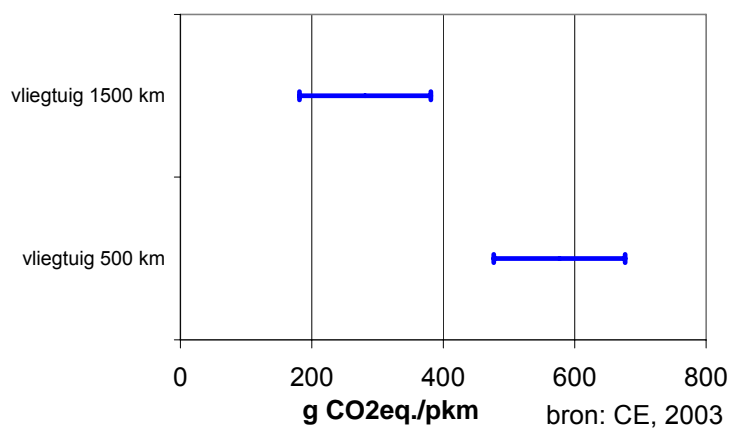
Figuur 47 Schatting van verdeling CO₂-emissies van personenauto's in Nederland over korte en lange ritten



Figuur 48 Verhouding tussen CO₂-emissies op korte en lange ritten



Figuur 49 CO₂-emissies bij vliegen



6.2 CO₂-emissie van bulk- en non-bulk goederentransport

In het personenvervoer zijn er vervoerwijzen die specifiek sterk zijn op korte of juist op lange ritten. In het vrachtvervoer is wegtransport in alle gevallen de belangrijkste vervoerwijze en hangt de vervoerwijzekeuze meer samen met de soort lading, dan met de afstand. Zo worden waardevolle en bederfelijke goederen per weg vervoerd en laagwaardige producten per spoor en binnenvaart (ECMT, 2003). De vervoerwijzen spoor en binnenvaart worden relatief vaker ingezet voor internationaal transport, omdat deze vervoerwijzen op grotere afstanden de concurrentie met wegtransport aankunnen. Op korte afstanden is wegtransport veelal het enige alternatief. Daarom geven we onderstaand een analyse weer van midden- en lange afstand transport. Hier hebben we kleine zeeschepen aan toegevoegd.

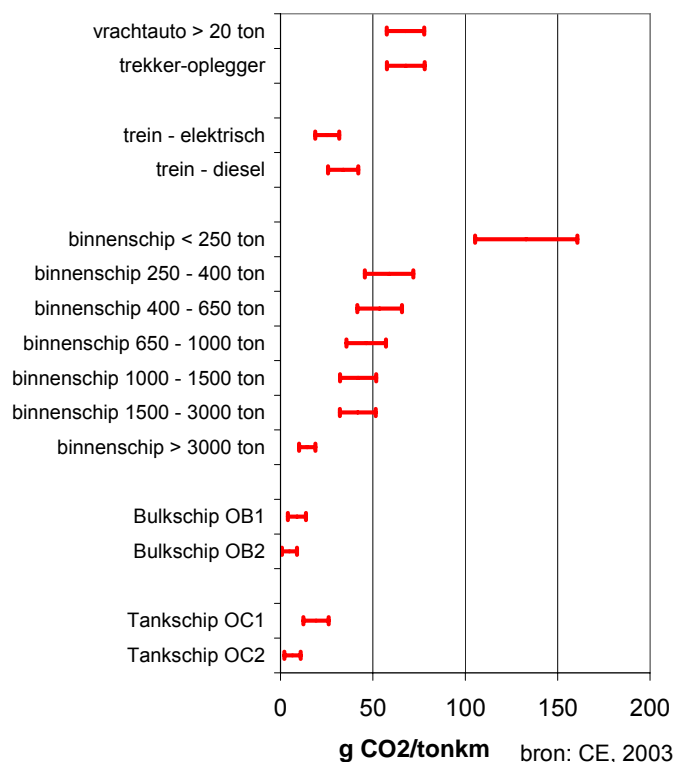
In het vrachtvervoer bestaan twee verschillende marktsegmenten: bulk- en non-bulkvervoer. Bulkvervoer omvat vervoer van grote hoeveelheden homogene onverpakte vaste stoffen of vloeistoffen. Non-bulk vervoer omvat stukgoed en containers, en heeft over het algemeen een lagere dichtheid dan bulkklading. De markt voor non-bulk vervoer groeit de laatste 10 jaar sneller dan de markt voor bulkvervoer.

Ten aanzien van de CO₂-emissies van verschillende vervoerswijzen, is het niet mogelijk om een eenduidige conclusie te trekken. Uit de onderstaande figuren valt een aantal zaken op:

- Emissies van non-bulk transport zijn aanzienlijk hoger dan van bulktransport. Dit komt door de lagere dichtheid van non-bulk transport. Het gaat hier veelal om volumelading.
- Over het algemeen geldt dat vanuit CO₂-oogpunt vervoer over spoor en water gepaard gaan met de laagste emissies. Maar in het non-bulk vervoer liggen de emissies van spoor, binnenvaart en grote vrachtauto's niet ver uit elkaar.
- De emissies binnen de vervoerwijzen verschillen aanzienlijk. De bandbreedte wordt veroorzaakt door: voor- en natransport, omwegen, en verschillen in gemiddelde beladingsgraad.
- Kleine binnenschepen zijn energie-inefficiënt.
- Vervoer van luchtvracht gaat gepaard met de hoogste emissies (zie Figuur 52).
- Elektrische tractie op het spoor is energie-efficiënter dan dieseltractie.

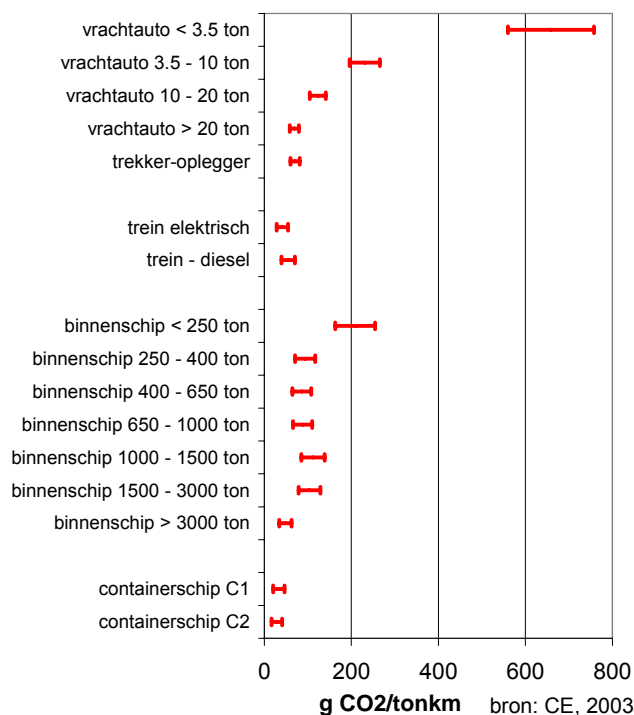


Figuur 50 CO₂-emissies bij bulktransport



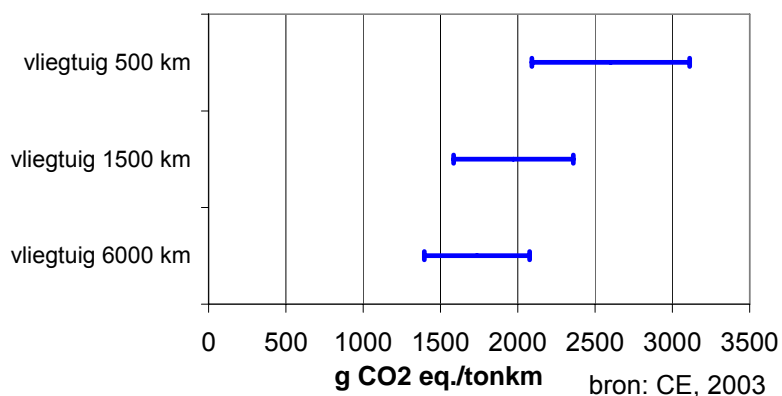
Noot: De scheepsklassen 1 en 2 verwijzen naar grootteklassen. Klasse 1 komt overeen met een gemiddelde capaciteit van 1100 ton, klasse 2 komt overeen met een capaciteit van gemiddeld 6.500 ton.

Figuur 51 CO₂-emissies bij non-bulk transport



Noot: Scheepsklasse1 komt overeen met gemiddeld 350 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) en klasse 2 met 800 TEU.

Figuur 52 CO₂-emissies bij vervoer van vracht door de lucht



Het is niet te verwachten dat de emissies van schepen en treinen in de toekomst snel zullen afnemen, omdat de levenscyclus van motoren in schepen en treinen kan oplopen tot 15 jaar. Voor de vervoermiddelen zelf is de levensduur nog hoger. Volgens (CE, 2003) nemen de CO₂-emissies in het vrachtvervoer tussen 2000 en 2010 niet af.



7 Conclusies bij Deel I

Deel I van dit rapport schetst een gedetailleerd overzicht van de rol van mobiliteit en de verschillende verkeersmodaliteiten in de CO₂-emissie in Nederland en Europa. Historische en voorziene toekomstige ontwikkelingen van omvang van de transportsector en van de CO₂-emissie van transport worden in kaart gebracht. Ook wordt aandacht besteed aan de bijdrage van lucht- en zeevaart. De belangrijkste conclusies uit deel I zijn:

Verkeersomvang

- Wegverkeer is de dominante vervoerwijze in Nederland en Europa.
- Het goederenvervoer is sneller gegroeid dan het personenvervoer in Nederland. In Europa als geheel is het personenvervoer juist sneller gegroeid.
- Verkeersvolumes blijven toenemen in de toekomst. De grootste groei wordt verwacht voor goederen- en personenvervoer over de weg en voor luchtvaart. Dit geldt zowel voor Nederland als voor Europa.
- De vervoersprestatie van de Nederlandse luchtvaart is in 10 jaar tijd verdubbeld. Wanneer alle vertrekkende vliegtuigen in beschouwing worden genomen is het aandeel van luchtvaart in de totale vervoersprestatie voor Nederland (op basis van reizigerskilometers) zo'n 30%.

CO₂ en energiegebruik

- CO₂-emissies van de verkeerssector zijn de afgelopen decennia sterk gegroeid in Nederland en wereldwijd. De groei in Europa lijkt iets minder. Toekomstscenario's laten ook sterke groei zien, maar deze is afhankelijk van de economische groei en de overheidssturing.
- Het aandeel van transport in het totale energiegebruik en CO₂-emissie verandert niet in de toekomstscenario's.
- De emissies van CO₂ uit in Nederland verkochte bunkerbrandstoffen is sterk gestegen sinds 1980.
- Wereldwijd neemt de uitstoot van CO₂ verder toe, met name door groei van de emissies van de energiesector en transport. De mobiliteitsgroei in ontwikkelingslanden is hier een belangrijke oorzaak van.
- CO₂-emissies van lucht- en scheepvaart stijgen sterk naar verwachting tussen 2000 en 2040.
- Vervoermiddelen zijn de afgelopen jaren niet zuiniger geworden en zonder specifiek beleid neemt het brandstofverbruik per voertuig in de toekomst niet af.
- De emissies van korte ritten en intra-Europese vluchten hebben een aanzienlijk aandeel in de CO₂-emissies van respectievelijk personenauto's en vliegtuigen.
- In het personenvervoer is het energiegebruik op korte ritten hoger dan op lange ritten. De broeikasgasemissies van luchtvaart zijn het hoogste, wanneer ook met niet-CO₂-gerelateerde effecten rekening gehouden wordt.
- Bulkvervoer is energie-efficiënter dan non-bulkvervoer (containers), maar de laatste is de grote groeimarkt.



State-of-the-Art CO₂ en Mobiliteit

Deel II - Inzicht in oplossingsrichtingen en aangrijpingspunten

Rapport

Delft, juli 2007

Opgesteld door: R.T.M (Richard) Smokers
L.C. (Eelco) den Boer
J. (Jasper) Faber





8 Inleiding bij deel II

Volgens de Trias Energetica kunnen milieu- en energieproblemen worden opgelost met middelen die aangrijpen op de elementen volume, structuur en efficiëntie. In het geval van CO₂-uitstoot door de verkeersector vertaalt zich dat in:

- beperking van de (groei in) verkeersprestatie (aantal kilometers);
- toepassing van brandstoffen met lagere ketenemissies van broeikasgassen;
- verlaging van energiegebruik per passagierskm of tonkm door verbeteren van voertuigrendement (door m.n. efficiëntere aandrijving, lagere rol- en luchtweerstand, gewichtsreductie), rijstijl/ritpatroon en/of bezettings- of beladingsgraad.

Deel II van het rapport 'State-of-the-Art CO₂ en Mobiliteit' schetst een overzicht van technische en niet-technische maatregelen die op dit moment in beeld zijn voor reductie van de CO₂-emissie door verkeer en bediscussieert beleidsmaatregelen die kunnen worden ingezet om de verschillende betrokken actoren te stimuleren om hun bijdrage te leveren. De focus ligt daarbij in belangrijke mate op wegverkeer maar ook luchtvaart en scheepvaart worden belicht.

Voor het realiseren van een duurzaam transportsysteem bestaat er nog geen blauwdruk. Het is echter wel duidelijk dat er niet één techniek is die de oplossing biedt. Zowel korte- als lange-termijn doelen kunnen alleen gehaald worden door effectieve combinaties van verschillende typen maatregelen die inspanningen vergen van alle bij personen- en goederenvervoer betrokken actoren. Overheid, voertuigfabrikanten, brandstoffenproducenten en gebruikers hebben ieder een rol bij de implementatie van deze maatregelen.

8.1 Categorisering van reductiemaatregelen

Bij CO₂-reducerende maatregelen dient allereerst onderscheid gemaakt te worden tussen de technische en niet-technische maatregelen, die op een directe, fysieke manier reductie van CO₂-emissies tot gevolg hebben, en de beleidsmaatregelen waarmee toepassing van deze technische en niet-technische maatregelen kan worden bewerkstelligd of bevorderd. Deze technische en niet-technische maatregelen kunnen verder worden gecategoriseerd op basis van bijv. het aangrijpingspunt waarop ze CO₂-emissies van transport beïnvloeden en de actoren die verantwoordelijk zijn voor ontwikkeling, beschikbaarmaking of toepassing van de opties.

Tabel 4 en Tabel 5 geven voorbeelden van technische en niet-technische maatregelen die door verschillende groepen stakeholders in verschillende verkeer- & vervoerssectoren kunnen worden geïmplementeerd ten behoeve van reductie van de CO₂-emissies. Een aantal van deze reductiemaatregelen wordt besproken in hoofdstuk 9 t/m 15.

Generieke en specifieke beleidsmaatregelen waarmee de verschillende technische en niet-technische opties uit Tabel 4 en Tabel 5 kunnen worden gestimuleerd of afgedwongen zijn vermeld in Tabel 6 en Tabel 7. Een aantal van deze beleidsmaatregelen wordt nader besproken in hoofdstuk 16.

Tabel 4 Voorbeelden van technische en niet-technische maatregelen voor reductie van CO₂-emissies in het wegverkeer

Stakeholder	Maatregelen	
<i>Industrie</i>	<i>Zuinige voertuigen</i>	<i>Alternatieve / duurzame brandstoffen</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • efficiëntere verbrandingsmotoren • alternatieve aandrijving: <ul style="list-style-type: none"> - start-stop systemen - hybride aandrijving - elektrische aandrijving - brandstofcellen • zuinige aircos / hulpsystemen • gewichtsreductie • verminderen luchtweerstand • lage rolweerstandbanden • langere / grotere vrachtauto's 	<ul style="list-style-type: none"> • LPG, aardgas • synthetische fossiele brandstoffen • biogas • vloeibare biobrandstoffen: <ul style="list-style-type: none"> - 1e generatie - 2e generatie • elektriciteit, waterstof (duurzaam of met CO₂-afvang)
<i>Gebruiker</i>	<i>Aankoop / vervoerwijzekeuze</i>	<i>Gebruik</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • aanschaf zuinige voertuigen: <ul style="list-style-type: none"> - kleinere voertuigen - efficiëntere voertuigen • verschuiving vervoerwijze-keuze 	<ul style="list-style-type: none"> • energiezuinige rijstijl • optimale bandenspanning • minder mobiliteit • hogere bezettingsgraad • efficiëntere logistiek / belading
<i>Wegbeheerder</i>	<i>Doorstroming</i>	<i>Infrastructuur</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • snelheidsbeperking • synchronisatie VRIs ('groene golf') • voorkomen files 	<ul style="list-style-type: none"> • OV-infrastructuur¹ • duurzamer OV¹ • efficiënte weginfrastructuur • informatiesystemen • geleide voertuigen

¹⁾ Als alternatief voor personenvervoer over de weg.



Tabel 5 Voorbeelden van technische en niet-technische maatregelen voor reductie van CO₂-emissies in de luchtvaart en scheepvaart

Stakeholder	Maatregelen	
<i>Industrie</i>	<i>Zuinige voertuigen</i>	<i>Alternatieve / duurzame brandstoffen</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • bestaande vliegtuigen: <ul style="list-style-type: none"> - winglets en riblets • nieuwe vliegtuigen: <ul style="list-style-type: none"> - zuiniger straalmotoren - propellormotoren - blended wing concept • bestaande schepen: <ul style="list-style-type: none"> - flappen en vinnen - coating - brandstofinjectie • nieuwe schepen: <ul style="list-style-type: none"> - zuinig rompontwerp - zuinige aandrijving (gasturbine, diesel-elektrisch) - schroefontwerp 	<ul style="list-style-type: none"> • HFO naar MDO voor schepen • vloeibare biobrandstoffen: <ul style="list-style-type: none"> - 1e generatie - 2e generatie • elektriciteit, waterstof (duurzaam of met CO₂-afvang)
<i>Gebruiker</i>	<i>Aankoop / vervoerwijzekeuze</i>	<i>Gebruik</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • aanschaf zuinig materieel 	<ul style="list-style-type: none"> • vliegtuigen: <ul style="list-style-type: none"> - training bemanning m.b.t. energiezuinig vliegen - minder tankering - beter onderhoud • schepen: <ul style="list-style-type: none"> - verlaging vaarsnelheid - just in time routing - weather routing
<i>Beheerder¹</i>	<i>Doorstroming</i>	<i>Infrastructuur</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • vliegtuigen: <ul style="list-style-type: none"> - openen luchtruim - verminderen verticale afstand • schepen: <ul style="list-style-type: none"> - optimaal aanleggen / wegvaren 	<ul style="list-style-type: none"> • stroom aan gates / walstroom • vliegtuig slepen • optimale waterwegen

¹⁾ Luchthaven, haven, luchtverkeersleiding.

Tabel 6 Opties voor beleidsmaatregelen voor CO₂-reductie in het wegverkeer

	Generieke maatregelen	Specifieke maatregelen
Convenanten		<ul style="list-style-type: none"> • convenant met auto-industrie en / of brandstofproducenten
Wetgeving / normstelling	<ul style="list-style-type: none"> • plafonnering emissies i.c.m. emissierechten / emissiehandel 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-emissienormen voor voertuigen • verplicht aandeel biobrandstoffen • verplichte bijmenging biobrandstoffen • normen voor efficiënte componenten: <ul style="list-style-type: none"> - banden - airco's
Financieel beleid / prijsbeleid	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-differentiatie van belastingen • km-heffing • CO₂-differentiatie van km-heffing • emissiehandel i.c.m. emissieplafond opgelegd aan: <ul style="list-style-type: none"> - brandstofproducenten - voertuigbezitters - vervoersbedrijven • verhoging accijnzen 	<ul style="list-style-type: none"> • R&D-subsidie • subsidie op praktijkproeven en demo's • tijdelijke aankoopsubsidie • tijdelijk belastingvoordeel voor zuinige auto's of alternatieve brandstoffen: <ul style="list-style-type: none"> - bijv. versnelde afschrijving van investering
Infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ in ontwerpeisen / MER voor ruimtelijke plannen en weginfrastructuur 	<ul style="list-style-type: none"> • investeren in OV-infrastructuur • stimulering alternatieve energie-infrastructuur
Informatie	<ul style="list-style-type: none"> • campagnes 	<ul style="list-style-type: none"> • ontwikkelen en verspreiden kennis over efficiënte logistiek • verbruiks- of CO₂-labelling • campagnes: <ul style="list-style-type: none"> - bijv. Het Nieuwe Rijden • opleiden chauffeurs
Voorbeeldfunctie	<ul style="list-style-type: none"> • duurzaam inkopen door overheid 	<ul style="list-style-type: none"> • duurzaam inkopen door overheid • CO₂- of verbruikseisen in aanbesteding OV (bussen)



Tabel 7 Opties voor beleidsmaatregelen voor CO₂-reductie in de lucht- en scheepvaart

	Generieke maatregelen	Specifieke maatregelen
Convenanten		<ul style="list-style-type: none"> • convenant met luchtvaartmaatschappijen • convenant met redersorganisaties
Wetgeving / normstelling	<ul style="list-style-type: none"> • plafonnering emissies (i.c.m. emissierechten / emissiehandel): <ul style="list-style-type: none"> - ETS 	<ul style="list-style-type: none"> • prestatienormen: <ul style="list-style-type: none"> - voor vliegtuigen of schepen - op vlootniveau - voor routes • verplicht aandeel biobrandstoffen • verplichte bijmenging biobrandstoffen
Financieel beleid / prijsbeleid	<ul style="list-style-type: none"> • emissiehandel (i.c.m. plafond) • CO₂-heffing • accijnzen op kerosine en scheepsbrandstof 	<ul style="list-style-type: none"> • R&D-subsidie • subsidie op praktijkproeven en demo's • tijdelijke subsidie voor investering in zuinig materieel • tijdelijk belastingvoordeel voor zuinige vlieg- of vaartuigen en alternatieve brandstoffen: <ul style="list-style-type: none"> - bijv. versnelde afschrijving van investering
Infrastructuur	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ in ontwerpeisen / MER 	<ul style="list-style-type: none"> • stimulering alternatieve energie-infrastructuur
Informatie	<ul style="list-style-type: none"> • -- 	<ul style="list-style-type: none"> • informatie over zuinig vliegen / varen • opleiding
Voorbeeldfunctie	<ul style="list-style-type: none"> • duurzaam inkopen door overheid 	<ul style="list-style-type: none"> • duurzaam inkopen door overheid

8.2 Informatiebronnen

Kwantitatieve gegevens m.b.t. maatregelen voor CO₂-reductie bij personenauto's zijn met name overgenomen uit (TNO, 2006a). In deze recente studie in opdracht van de Europese Commissie is op basis van informatie uit een groot aantal literatuurbronnen (o.a. (Concawe, 2006; DLR, 2004; IEA, 2005; Ricardo, 2003; UBA, 2003)) en door ACEA, JAMA en KAMA aangeleverde data een inschatting gemaakt van het potentieel en de kosten voor verdere CO₂-emissiereductie voorbij de 140 g/km doelstelling van het convenant tussen de Europese Commissie en de auto-industrie.

De in dit rapport opgenomen informatie over kosten en WTW-reductiepotentiëlen van alternatieve brandstoffen is voor een belangrijk deel gebaseerd op (Concawe, 2006). Dit is de meest recente en meest veelomvattende well-to-wheel analyse die op dit moment in Europa beschikbaar is. Daarnaast wordt ook gebruik gemaakt van verschillende CE-rapporten op dit gebied.

Voor de overige onderwerpen zijn de bronnen diverser. Voor andere transporttoepassingen bestaan geen overzichtsrapporten of grote vergelijkende studies waaruit eenvoudig informatie kan worden geput waarmee verschillende opties consistent kunnen worden beschreven en onderling vergeleken.

8.3 Leeswijzer

In de volgende hoofdstukken worden per deelsector technische en niet-technische opties voor reductie van CO₂-emissies besproken. Per deelsector wordt ook kort ingegaan op specifieke beleidsmaatregelen die kunnen worden ingezet om de toepassing van de beschreven technische en niet-technische CO₂-reductieopties te stimuleren of af te dwingen. Generieke beleidsmaatregelen die op meer deelsectoren toepasbaar zijn of meer deelsectoren beïnvloeden worden besproken in hoofdstuk 16.

De volgende bijlagen bevatten voor het lezen van deel II relevante informatie:

- Bijlage A: Lijst van afkortingen.
- Bijlage E: Methodologische aspecten van de beoordeling van opties voor CO₂-reductie.



9 Technische maatregelen voor CO₂-reductie bij personenauto's op middellange termijn

9.1 Inleiding

Technische maatregelen om de CO₂-emissie van personenauto's te reduceren omvatten ondermeer efficiëntere verbrandingsmotoren (o.a. directe benzine-inspuiting, variabele kleppenbediening en down-sizing i.c.m. drukvulling), start-stop systemen en hybride aandrijving, zuinige airco's/hulpsystemen, gewichtsreductie en verminderen van lucht- en rolweerstand. Op langere termijn komen ook brandstofcellen voor dit doel in beeld.

Nieuwe technieken blijken, zeker in het beginstadium, in het gebruik nadelen te hebben t.o.v. de conventionele techniek. Prestaties vallen tegen, de opslag van energie neemt ruimte in, of de actieradius is te klein (zoals bij elektrische voertuigen en aardgas). In het verleden is in onderzoek en beleidsvorming te gemakkelijk aan consumentenwensen voorbij gegaan. Deze conclusie kan ook worden omgedraaid: consumenten zijn bij aanschaf van een auto bereid veel te betalen voor aspecten die zij als toegevoegde waarde ervaren. Een uitdaging voor de industrie bij introductie van schone of energiezuinige technologie, zeker als die voor de consument tot hogere kosten leidt, is er voor te zorgen dat de techniek ook voor de consument toegevoegde waarde oplevert. Het succes van de direct ingespoten dieselmotor is hier een goed voorbeeld van. Behalve een significante sprong in motorrendement leverde deze techniek ook een grote verbetering van prestaties. Hybride aandrijving en brandstofcellen kunnen ook op die manier worden ingezet om 'betere' auto's te maken. De vraag is echter wel of er geen spanningsveld ontstaat tussen het creëren van toegevoegde waarde voor de gebruiker en het optimaliseren van aandrijfrendement.

Hieronder wordt voor personenauto's een aantal technische maatregelen in detail beschreven. Per maatregel wordt ingegaan op het reductiepotentieel op voertuigniveau, de kosten van de maatregel op voertuigniveau en op de kosteneffectiviteit uitgedrukt in CO₂-vermijdingskosten. Inschattingen van het totale potentieel van de maatregelen bij toepassing in de Nederlandse voertuigvloot worden gepresenteerd in paragraaf 9.6.

Personenauto's op diesel emitteren Tank-to-Wheel 10 tot 20% minder CO₂ dan vergelijkbare voertuigen op benzine. Een shift van benzine naar diesel zou dus tot lagere CO₂-emissies voor de personenautosector kunnen leiden. De laatste 10 jaar heeft er echter in Europa al een sterke verschuiving naar diesel plaatsgevonden als gevolg van populariteit van moderne direct ingespoten dieselmotoren. Deze verschuiving is een van de belangrijkste oorzaken van de onder het 'ACEA-convenant' behaalde reductie van de verkoopgemiddelde CO₂-emissie van nieuwe auto's in Europa (zie paragraaf 9.8.2). Europa-breed zal deze trend op middellange termijn leiden tot een 50%/50% verdeling van benzine en diesel in de vloot. Deze tendens leidt nu al tot tekorten aan diesel in de pro-

ductie door Europese raffinaderijen en import vanuit de VS. Een verdere verschuiving van deze productie naar een hoger aandeel diesel leidt tot een energetisch sub-optimale situatie bij raffinaderijen die ten koste gaat van de CO₂-winst die op voertuigniveau geboekt kan worden. Daarnaast is de verwachting dat door de invoering van directe insputting bij benzinevoertuigen het verschil in CO₂-emissies kleiner wordt. Verschuiving van benzine naar diesel wordt in dit hoofdstuk dus niet meegenomen als serieuze reductieoptie voor de middellange en lange termijn.

9.2 Maatregelen om nieuwe personenauto's zuiniger te maken (korte en middellange termijn)

9.2.1 Wat houdt de optie in?

Opties waarmee voertuigen op korte en middellange termijn zuiniger kunnen worden gemaakt grijpen aan op de volgende punten:

- rendement van de verbrandingsmotor;
- rendement van de transmissie;
- totaal rendement van de aandrijflijn;
- rol- en luchtweerstand;
- voertuigmassa;
- verbruik van hulpsystemen en accessoires.

Verbrandingsmotor

Maatregelen op het gebied van verbetering van verbrandingsmotoren betreffen voor een groot deel opties ter verbetering van het rendement van de motor in deellastbedrijf. Belangrijke elementen daarbij zijn downsizing in combinatie met drukvulling en variabele bediening van kleppen. Voor benzinevoertuigen is directe insputting een belangrijke optie (wordt in moderne diesels al toegepast). Voor de langere termijn zijn ook geavanceerde verbrandingsconcepten in ontwikkeling zoals HCCI (homogeneous charge compression ignition) en CAI (controlled auto-ignition) met deze technieken groeien benzine- en dieselmotoren naar elkaar toe en wordt geprobeerd de voordelen van beide principes te combineren. Het is op dit moment echter moeilijk in te schatten of deze technieken ooit in de praktijk toepasbaar worden dan wel de nu voorziene voordelen realiseren.

Transmissie

Geavanceerde transmissies zorgen er voor dat de motor meer in dat deel van zijn kenveld kan worden gebruikt waar het omzettingsrendement hoog is. Dit wordt nog verder verbeterd door de toepassing van start-stop systemen en hybride aandrijving.

Aandrijflijn: start-stop

Een start-stop systeem maakt het mogelijk om de motor tijdens stilstand van het voertuig uit te schakelen en snel weer in te schakelen zodra het gaspedaal wordt ingetrapt. Dit bespaart brandstof die tijdens stationair draaien van de motor wordt verbruikt.



Aandrijflijn: hybride

Volgens de generieke definitie wordt in het geval van een hybride aandrijving het voertuig aangedreven door een combinatie van aandrijflijnen waarvan er tenminste één een reversibele energieopslag heeft. Voor de hybride voertuigen waar we het in de regel over hebben betreft dat enerzijds een conventionele verbrandingsmotor op benzine of diesel en anderzijds een elektrische aandrijving bestaande uit één of meer elektromotoren en een batterij en/of supercondensator voor opslag van elektrische energie. In deze voertuigen neemt de elektrische aandrijving het over van de verbrandingsmotor in situaties met lage belasting en assisteert de elektromotor de verbrandingsmotor wanneer veel vermogen wordt gevraagd. Wanneer de verbrandingsmotor in een gunstig deel van zijn kenveld draait, wordt elektriciteit opgewekt die voor later gebruik wordt opgeslagen. Bij hybride aandrijving levert ook het terugwinnen van remenergie een verlaging van brandstofverbruik en CO₂-emissies op. Voor hybride aandrijving worden verschillende niveaus van hybridisatie onderscheiden afhankelijk van het vermogen van elektromotor(en) en batterij uiteenlopend van eenvoudige start-stop systemen met beperkte terugwinning van remenergie, tot zgn. mild hybrids en full hybrids. Daarnaast zijn nog verschillende hybride configuraties mogelijk zoals parallel hybrides waarin verbrandingsmotor en elektromotor allebei de wielen (kunnen) aandrijven, serie-hybrides waarin de verbrandingsmotor wordt gebruikt in een generatorset en de wielen alleen elektrisch worden aangedreven, alsmede allerlei tussenvormen. Een laatste onderscheid betreft hybrides die alleen op getankte brandstof rijden (en alle aan boord gebruikte elektriciteit dus zelf opwekken) en hybrides die een deel van hun energiebehoefte dekken door opladen van de batterij uit het stopcontact. Hybride voertuigen kunnen als alternatief voor conventionele voertuigen worden beschouwd, maar ook als verbeterde conventionele voertuigen. In de context van deze studie gaan we er vanuit dat het merendeel van de hybrides die in de komende decennia in Europa op de markt komen volledig op benzine en diesel rijden en geen elektriciteit uit het stopcontact laden, zoals ook nu al het geval is bij de Toyota Prius, de Honda Civic Hybrid en de Lexus RX 400h en GS 450h die op dit moment in Nederland te koop zijn.

Vermindering van energievraag: rol- en luchtweerstand en massa

Verbetering van aërodynamica en lage rolweerstandsbanden leiden tot vermindering van weerstandsverliezen. Gewichtsreductie vermindert de energie die nodig is voor versnelling van het voertuig en verlaagt ook indirect de rolweerstand. Verder is er een groot aantal energiegebruikende hulpsystemen waarvan het rendement nog aanzienlijk verbeterd kan worden.

M.b.t. gewichtsreductie beperkt deze paragraaf zich tot relatief conservatieve maatregelen in de sfeer van gebruik van hoge-sterkte staal en verbeterde constructietechnieken voor de body-in-white¹⁰ en beperkte toepassing van aluminium en kunststoffen. Toepassing van geavanceerde lichtgewichtmaterialen zoals composieten kan verdere gewichtsbesparing opleveren maar over de kosten en toepasbaarheid in massaproductie is vooralsnog te weinig bekend.

¹⁰ Kale carrosserie van het voertuig.

Tabel 8 geeft een overzicht uit (TNO, 2006a) van de technische opties die nu (in dit geval vanaf 2002) of op korte tot middellange termijn kunnen worden ingezet om het energiegebruik van nieuw verkochte voertuigen te reduceren. Een deel van deze opties wordt reeds ingezet of gaat nog ingezet worden in de context van het convenant tussen de Europese Commissie en ACEA / JAMA / KAMA, met als doelstelling om de gemiddelde CO₂-emissie van nieuwe auto's in 2008/9 naar 140 g/km te brengen (typekeuringswaarde). Andere maatregelen kunnen worden gebruikt voor een verdere reductie tot 120 g/km of nog lager in de periode na 2008/9.

9.2.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

De in Tabel 8 genoemde opties kunnen op velerlei wijzen worden gecombineerd tot pakketten van CO₂-reducerende maatregelen. De kosten van verschillende opties zijn daarbij min of meer optelbaar, maar de totale CO₂-reductie is niet eenvoudigweg gelijk aan het product van de rendementverbeteringen van de verschillende opties ($1 - \prod(1 - \Delta_{CO_2})$). Rekenhoudend hiermee zijn in (TNO, 2006a) kostencurves samengesteld die het reductiepotentieel van verschillende pakketten en de bijbehorende kosten representeren. Deze zijn voor verschillende voertuigsegmenten weergegeven in Figuur 53.

Figuur 54 geeft een vergelijking uit (Concawe, 2006). De figuur vergelijkt voertuigen uit 2002 met verbeterde conventionele voertuigen zoals die in 2010 op de markt kunnen zijn en met hybride voertuigen.

Een gemiddeld Europees middenklasse voertuig op benzine verbruikt op de typekeuringstest 7,8 l/100km, tegen 5,9 l/100km voor een dieselveertuig. De hybride Toyota Prius heeft een gecombineerd brandstofverbruik (stad + buitenweg) op de typekeuringstest van 4,3 l/100km. Dat is ongeveer 35% lager dan van vergelijkbare conventionele voertuigen. De hybride versie van de Honda Civic en de Lexus R400h hebben een 23% resp. 20% lager brandstofverbruik dan hun conventionele tegenhangers. In het geval van de Prius is de 35% reductie niet alleen het resultaat van de toepassing van een hybride aandrijflijn. Additionele verbruiksvoordelen worden veroorzaakt door aanvullende maatregelen zoals gewichtsreductie, verbeterde aërodynamica en lage-rolweerstandsbanden. Het praktijkverbruik wordt verder gereduceerd door de toepassing van elektrische stuurbeheersing en een elektrisch aangedreven airco. Vanzelfsprekend is de Prius niet het eindpunt in de technologische ontwikkeling m.b.t. zuinige voertuigen. Door verdere ontwikkeling van de toegepaste technologieën en verdere integratie en optimalisatie van componenten lijkt een overall brandstofverbruiksreductie van 50% haalbaar. Combinatie van hybride aandrijving met een dieselmotor leidt tot de laagste verbruikswaarden. Een dergelijke aanpak is recent aangekondigd door PSA, in de vorm van hybride concept-versies van de Peugeot 307 en de Citroën C4. Op middellange tot langere termijn mag verwacht worden dat de combinatie van hybride aandrijving, geoptimaliseerde verbrandingsmotoren en andere verbruiksreducerende technologieën leidt tot voertuigen die op de typekeuringstest 3 tot 3,5 l/100km verbruiken, met prestaties die vergelijkbaar zijn met die van de huidige generatie voertuigen. Leer- en schaafeffecten



en verdere innovaties zullen naar verwachting ook leiden tot een sterke reductie van de additionele kosten van dergelijke zuinige voertuigen.

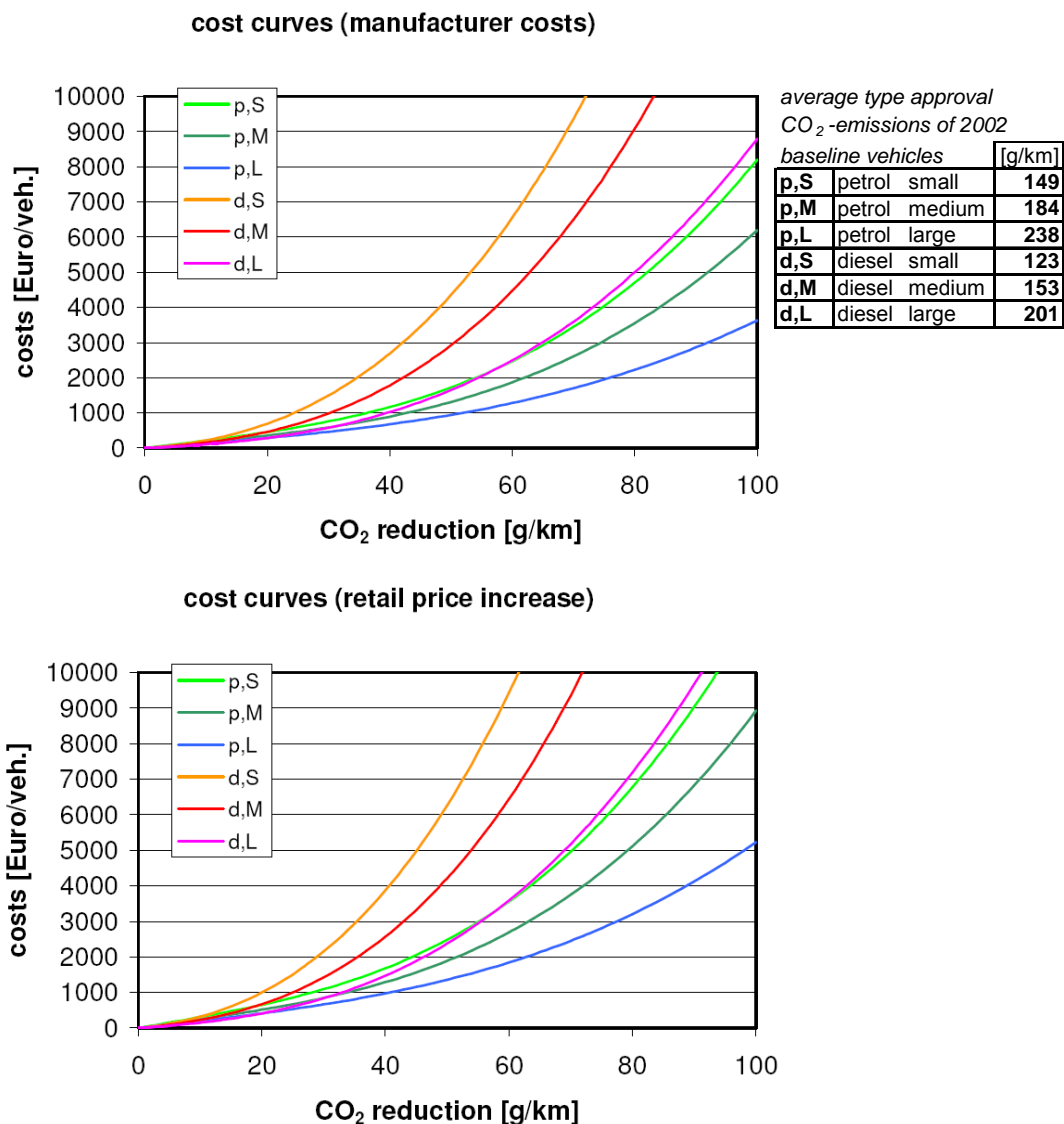
Tabel 8 Technische opties voor de korte en middellange om de CO₂-emissies van nieuwe auto's te reduceren (TNO, 2006a)

	Petrol vehicles	Reduction	Diesel vehicles	Reduction
Engine	Reduced engine friction losses	4%	Reduced engine friction losses	4%
	DI / homogeneous charge (stoichiometric)	3%	4 valves per cylinder	--
	DI / Stratified charge (lean burn / complex strategies))	10%	Piezo injectors	--
			Mild down-sizing	3%
	Medium down-sizing with turbocharging	10%	Medium down-sizing	5%
	Strong down-sizing with turbocharging	12%	Strong down-sizing	7%
	Variable Valve Timing	3%		
	Variable valve control	7%		
	Cylinder deactivation	--	Cylinder deactivation	--
	Variable Compression Ratio	--		
	Optimised cooling circuit	1.5%	Optimised cooling circuit	1.5%
	Advanced cooling circuit + electric water pump	3%	Advanced cooling circuit + electric water pump	3%
			Exhaust heat recovery	1.5%
Transmission	Optimised gearbox ratios	1.5%	6-speed manual/automatic gearbox	--
	Piloted gearbox	4%	Piloted gearbox	4%
	Continuous Variable Transmission	--	Continuous Variable Transmission	--
	Dual-Clutch gearbox	5%	Dual-Clutch gearbox	5%
Hybrid	Start-stop function	4%	Start-stop function	3%
	Start-stop + regenerative braking	7%	Start-stop + regenerative braking	6%
	Mild hybrid (motor assist)	11%	Mild hybrid (motor assist)	10%
	Full hybrid (electric drive capability)	22%	Full hybrid (electric drive capability)	18%
Body	Improved aerodynamic efficiency	1.5%	Improved aerodynamic efficiency	1.5%
	Mild weight reduction	1%	Mild weight reduction	1%
	Medium weight reduction	2.5%	Medium weight reduction	2.5%
	Strong weight reduction	6%	Strong weight reduction	6%
Other	Low rolling resistance tyres	2%	Low rolling resistance tyres	2%
	Electrically assisted steering (EPS, EPHS)	2.5%	Electrically assisted steering (EPS, EPHS)	2.5%
	Efficient alternator	--	Efficient alternator	--
	Heat batteries for accelerated engine warm-up	--	Heat batteries for accelerated engine warm-up	--

Notes:

- *Reduced engine friction losses*: includes low friction engine and gearbox lubricants.
- *Mild down-sizing with turbocharging*: ≈ 10% cylinder content reduction.
- *Medium down-sizing with turbocharging*: ≈ 20% cylinder content reduction.
- *Strong down-sizing with turbocharging*: ≈ 30% cylinder content reduction.
- *Mild weight reduction*: ≈ 5% reduction of weight on Body-In-White.
- *Medium weight reduction*: ≈ 15% reduction of weight on Body-In-White.
- *Strong weight reduction*: ≈ 30% reduction of weight on Body-In-White.

Figuur 53 Kostencurves voor CO₂-reductie bij personenauto's

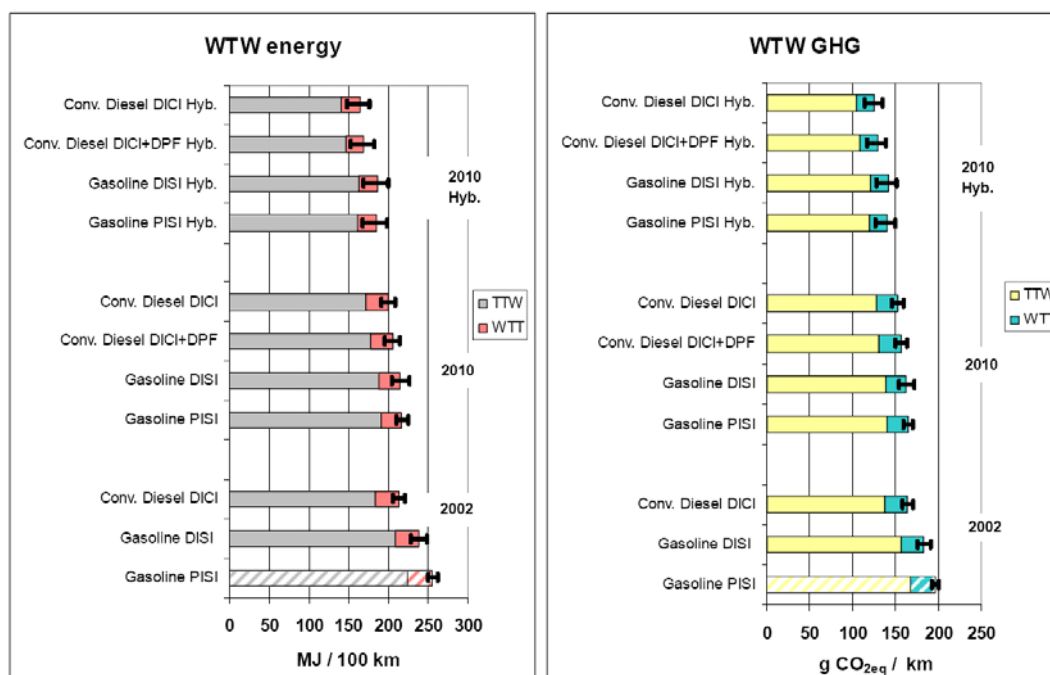


Bron: TNO, 2006a.

N.B. Gebaseerd op additionele 'manufacturer costs' (boven) en additionele consumentenprijs (onder) voor het bereiken van CO₂-reductie in verschillende segmenten personenauto's (klein/mid-denklasse/groot en benzine/diesel). Startpunt van de curves zijn de gemiddelde CO₂-emissiewaarden zoals gemeten op de typekeuringstest van voertuigen in de verschillende segmenten in 2002



Figuur 54 WTW energiegebruik en CO₂-emissies van huidige en toekomstige conventionele voertuigen en van hybride voertuigen volgens (Concawe, 2006)



De staafdiagrammen geven direct energiegebruik en directe emissies weer in de gebruiksfase (TTW) en de indirecte effecten bij de productie van brandstoffen (WTT). De halvers geven de onzekerheidsmarge in de uitkomsten weer

9.2.3 Voor- en nadelen

De meeste in Tabel 8 genoemde opties om voertuigen zuiniger te maken kunnen worden ingezet zonder dat daarmee de prestaties of de bruikbaarheid van voertuigen wordt aangetast. De aangegeven reductiepotentiëlen zijn in ieder geval ingeschat onder die aanname. Wanneer bij toepassing van deze technieken wordt ingeleverd op prestaties zijn in een aantal gevallen hogere besparingen mogelijk.

Op dit moment zijn hybride voertuigen nog niet geschikt voor het trekken van een zware caravan. In hoeverre toekomstige modellen daar wel geschikt voor zijn, valt vooralsnog niet te zeggen. Hybride aandrijving biedt daarentegen wel voordelen m.b.t. rijprestaties en comfort. Een hybride aandrijflijn zoals toegepast in de Toyota Prius werkt als een traploze automaat, hetgeen bijvoorbeeld rijden in de file veel minder onaangenaam maakt. Het hoge koppel van de elektromotor bij lage toeren maakt dat hybride voertuigen in het algemeen pittig kunnen optrekken vanuit stilstand. Bij hogere snelheden levert de elektromotor snel boostvermogen wanneer het gaspedaal dieper wordt ingetrapt.

9.2.4 Vermijdingskosten

Ter voorbereiding van nieuw EU-beleid m.b.t. CO₂-emissies van personenauto's zijn in (IEEP, 2005) en (TNO, 2006a) inschattingen gemaakt van de kosten en baten van verschillende technische opties die kunnen worden ingezet om de ge-

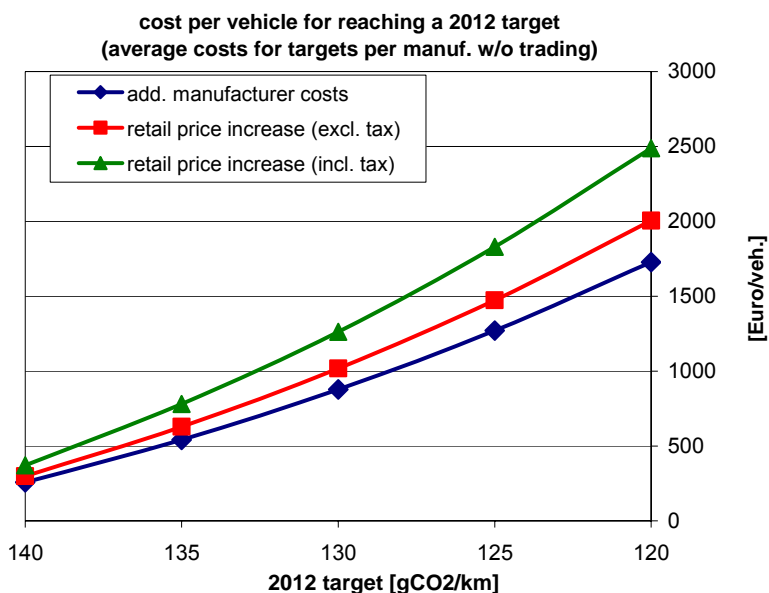
middelste CO₂-emissie (typekeuringswaarde) van nieuw verkochte personenauto's te reduceren van 140 g/km in 2008/9 naar 120 g/km in 2012. TNO (2006a) bouwt voort op (IEEP, 2005), maar komt op basis van aanvullende data en een nieuwe evaluatie van eerder beschikbare gegevens tot hogere schattingen van de kosten voor het bereiken van de benodigde reductie. TNO (2006a) berekent dat voor het halen van 120 g/km op de typekeuringstest de inzet van hybride voertuigen nodig is in combinatie met andere maatregelen om motoren efficiënter te maken en de energievraag van het voertuig te verminderen.

Onder de aanname dat het aankoopgedrag niet wordt beïnvloed en dat autonome trends m.b.t. het aandeel diesels en de gewichtstoename van voertuigen zich doorzetten wordt berekend dat nieuwe auto's in Europa tussen 2008/9 en 2012 zo'n € 2.500 duurder zullen worden als gevolg van technische maatregelen die nodig zijn om de gewenste CO₂-emissiereductie van gemiddeld 140 g/km naar 120 g/km te bewerkstelligen. De consument verdient deze meerprijs slechts deels terug door de bijbehorende brandstofbesparing. De netto kostenstijging heeft waarschijnlijk ook invloed op aankoopgedrag en voertuiggebruik, hetgeen verder kan bijdragen aan het bereiken van de CO₂-reductie. Bij een olieprijs van 50 €/bbl bedragen de vermijdingskosten voor het halen van 120 g/km zo'n 150 - 200 €/ton. De technische maatregelen die nodig zijn om in 2008/9 140 g/km te halen zijn goedkoper en verdienen zich op consumentenniveau wel terug. De impact van het vigerende EU-beleid tot 2010 kan dus deels gecompenseerd worden door de mobiliteitstoename die het gevolg is van lagere kosten.

De kostenschattingen in (TNO, 2006a) gaan voor de nieuw toegepaste technieken uit van voldoende grote productieseries (> 100.000 p.a.), overigens zonder hier expliciet aan te rekenen. Concrete data op grond waarvan leereffecten, economies-of-scale en de impact van innovaties op het gebied van product en productiemethode kunnen worden ingeschat zijn ook niet eenvoudig voorhanden. Desalniettemin lijkt het redelijk om te veronderstellen dat op langere termijn (bijv. 2020/2030) de kosten voor bovenbeschreven technieken beduidend lager kunnen zijn dan wat nu in (TNO, 2006a) voor de periode 2008/2012 is ingeschat.



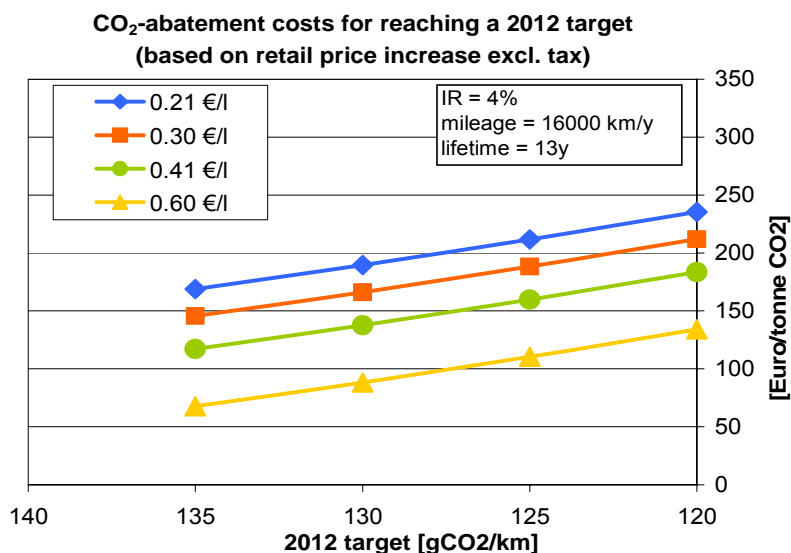
Figuur 55 Meerkosten per voertuig om de gemiddelde CO₂-uitstoot (op typekeuringstest) van nieuwe auto's in de EU-15 te reduceren van 140 g/km in 2008/9 tot een target voor 2012 tussen 140 en 120 g/km



Bron: TNO, 2006a.

N.B.: De kosten betreffen alleen de additionele kosten voor productie (manufacturer costs) c.q. aanschaf van nieuwe voertuigen (retail price increase).

Figuur 56 CO₂-vermijdingskosten (in €/ton vermeden CO₂-equivalenten) als functie van doelstelling en olieprijs¹¹ voor het halen van een 2012 doelstelling van 140 – 120 g/km voor nieuwe voertuigen (op basis van typekeuringstest) door middel van technische maatregelen die aangrijpen op voertuigniveau



Bron: TNO, 2006a.

N.B.: In de berekening van vermijdingskosten zijn brandstofkosten en CO₂-reductie berekend op basis van geschat real-world brandstofverbruik en is voor CO₂-reductie tevens rekening gehouden met CO₂-emissies in de brandstofketen (Well-to-Wheel). De weergegeven brandstofkosten corresponderen met olieprijsen van 25, 36, 50 en 74 €/bbl.

¹¹ De in de figuur weergegeven brandstofkosten (excl. belastingen) van 0,21, 0,30, 0,41 en 0,60 €/liter komen overeen met olieprijsen van 25, 36, 50 en 74 €/bbl.

Kostenverwachtingen voor de langere termijn

Bovenstaande berekeningen van kosten en kosteneffectiviteit zijn gebaseerd op kostendata die geldig zijn voor de periode tussen nu en 2015. Het valt te verwachten dat veel van de genoemde technieken in de toekomst significant goedkoper kunnen worden. M.b.v. de theorie van leercurves (zie ook Bijlage E) kan worden geschat hoe de kosten van een product afnemen als functie van de cumulatieve productie. Dit is echter een zeer 'zachte' wetenschap, vooral door gebrek aan inzicht in de waarde van de 'learning rate' voor specifieke producten. Op dit moment zijn er zo'n 500.000 hybride voertuigen in de wereld geproduceerd en bedragen de meerkosten rond de € 4.000. Bij een learning rate van 0,8 zijn deze kosten gehalveerd bij een cumulatieve productie van 5.000.000. Bij een learning rate van 0,9 moeten er echter 10 keer zoveel hybrides (50.000.000) geproduceerd worden om tot dezelfde kostenreductie te komen. Het is dus zeker dat kosten van veel nieuwe technieken de komende decennia sterk kunnen dalen, maar het is moeilijk te voorspellen hoeveel ze zullen dalen.

9.2.5 Instrumenteerbaarheid

Specifieke beleidsmaatregelen waarmee de ontwikkeling en implementatie van zuinige personenauto's kan worden gestimuleerd of afgedwongen worden besproken in paragraaf 9.7.

9.2.6 Synergie met andere gebieden

Zuinige auto's zijn niet perse schoner m.b.t. luchtverontreinigende uitlaatgassen dan minder zuinige auto's. Sterker nog, door de hogere marge op grote, zware voertuigen kan de kwaliteit van het uitlaatgasnabehandelingssysteem op grote auto's zoveel beter zijn dan bij kleine voertuigen dat grote, onzuinige voertuigen netto schoner zijn. Hybride aandrijving is niet vanzelf schoner dan conventionele aandrijving maar biedt wel mogelijkheden voor verdergaande emissiereductie. In het geval van de Prius is dat gebruikt om te voldoen aan de Californische SULEV-eisen. Hybride voertuigen die een deel van hun energie uit het stopcontact betrekken ('plug-in hybrids') en daardoor een grotere actieradius hebben in de puur elektrische mode (rijden op de elektromotor terwijl de verbrandingsmotor uitgeschakeld is) kunnen lokale emissievoordelen opleveren, bij voorbeeld in de context van milieuzonering.

CO₂-reductie bij personenauto's draagt wel belangrijk bij aan verbetering van de energiezuinigheid door vermindering van de afhankelijkheid van geïmporteerde olie.



9.3 Verlaging van rolweerstand en van wrijving in de motor

9.3.1 Wat houdt de optie in?

Onder deze kop worden twee opties behandeld die zowel bij nieuwe voertuigen als bij bestaande voertuigen kunnen worden toegepast:

- banden met lage rolweerstand;
- smeerolie met lage viscositeit.

Door verandering in rubbersamenstelling kan de rolweerstand van banden worden verlaagd. Dit is overigens niet triviaal omdat banden aan een veelheid van prestatie-eisen moeten voldoen m.b.t. grip op verschillende wegdekken en onder verschillende weersomstandigheden, andere veiligheidsaspecten, geluid en levensduur. Er is een groot verschil in rolweerstand tussen banden die nu op de markt zijn. Overigens bestaat er nog geen standaard voor de definitie van wat lage-rolweerstandbanden (low rolling resistance tyres of LRRT) zijn. Lage-rolweerstandbanden kunnen af-fabriek worden gemonteerd, maar ook als retrofit optie op bestaande voertuigen. Banden gaan gemiddeld zo'n 3 jaar mee.

Behalve de band zelf heeft ook de bandenspanning invloed op energiegebruik en CO₂-emissies van het voertuig. In NL wordt reeds een overheids campagne gevoerd voor het rijden met correcte bandenspanning. Monitoringsystemen (tyre pressure monitoring system of TPMS) aan boord van het voertuig kunnen worden gebruikt om automobilisten te informeren over de bandenspanning en te stimuleren om de banden op correcte spanning te houden. Dit soort systemen moeten in principe in de fabriek gemonteerd worden.

Reductie van de wrijvingsweerstand in de motor door toepassing van geavanceerde motorolie (low viscosity lubricant of LVL) is ook een mogelijkheid om verbruik en CO₂-emissies van nieuwe en bestaande voertuigen te verminderen. De levensduur van motorolie is gemiddeld 1 jaar.

9.3.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Voor alle drie de genoemde opties geldt dat er op voertuigniveau enige procenten CO₂-reductie mee bereikt kan worden. Getallen uit (TNO, 2006a) zijn te vinden in Tabel 9.

9.3.3 Voor- en nadelen

De hierboven genoemde opties hebben in principe geen nadelen. Belangrijk voordeel van LRRT en LVL is dat ze ook op bestaande voertuigen kunnen worden toegepast, waardoor sneller een relatief grote reductie kan worden gerealiseerd.

9.3.4 Vermijdingskosten

CO₂-vermijdingskosten voor verschillende olieprijsen zijn berekend in (TNO, 2006a) en samengevat in Tabel 9. TPMS blijkt een zeer aantrekkelijke optie, maar LRRT en LVL blijken relatief dure opties. Dit komt niet zozeer door de meerkosten t.o.v. het standaardproduct (1^e kolom) maar door de beperkte levensduur van banden en olie waardoor deze kosten over een relatief beperkte absolute CO₂-reductie worden omgeslagen.

Tabel 9 Kosten, reductiepotentieel en CO₂-vermijdingskosten van lage-rolweerstandsbanden (LRRT), monitoringssystemen voor bandenspanning (TPMS) en smeermiddelen met lage viscositeit (LVL)

	Cost per vehicle [€]	Lifetime [y]	CO ₂ -reduction [%]	CO ₂ -abatements costs [€/tonne]			
				25	36	50	74
Oil price [€/bbl]				25	36	50	74
LRRT	49	2.5	3.0%	139	109	73	15
TPMS	58	12.0	2.5%	5	-20	-50	-98
LVL	20	1.0	2.5%	181	150	113	53

Bron: TNO, 2006a.

N.B.: Levensduur van banden en smeermiddelen wordt meer bepaald door gereden kilometers dan door levensduur. Berekening is op basis van een gemiddeld jaarkilometrage van 13.000 km.

9.3.5 Instrumenteerbaarheid

TPMS-systemen kunnen als in-car systeem via BPM-vrijstelling of subsidie gestimuleerd worden, maar kunnen ook in Europees verband verplicht worden gesteld op nieuwe voertuigen. Dit laatste wordt op dit moment door de Europese Commissie overwogen.

LRRT en LVL zijn op basis van maatschappelijk kosten (excl. belastingen) niet kosteneffectief, maar kunnen voor consumenten wel interessant zijn. Een belangrijke voorwaarde is daarbij beschikbaarheid van betrouwbare en onafhankelijke informatie. Dit vereist testprocedures waarmee energiezuinige banden en smeermiddelen zich kunnen onderscheiden, en vooral m.b.t. motorolie goede informatie over welke olie in welke motoren gebruikt mag worden. Stimulering via subsidies lijkt lastig en niet zinvol. Belastingvoordeel zou kunnen worden gecreëerd door toepassing van een laag BTW-tarief. Op Europees niveau zou normering kunnen worden opgesteld, op basis van genoemde testprocedures, waarmee rolweerstand van banden en viscositeit (of andere relevante karakteristieken) van motorolie aan minimumeisen worden onderworpen. Een labellingsysteem kan worden geïntroduceerd om producten onderling te kunnen vergelijken.

9.3.6 Synergie met andere gebieden

Op het gebied van banden wordt ook gewerkt aan stillere banden. Het is niet bekend of technische maatregelen die de rolweerstand verminderen positief of negatief uitwerken op de geluidsemisatie van banden.



9.4 Zuinige airco's

9.4.1 Wat houdt de optie in?

Op het gebied van airco's voor toepassing in auto's vinden er veel ontwikkelingen plaats. Dit betreft enerzijds het verminderen van de emissies van koelmiddelen. De meest schadelijke koelmiddelen, op basis van CFKs zijn reeds uitgebannen (bijv. CFK-12, Dichlorofluormethaan, GWP = 8.500). Moderne airco's werken met het minder schadelijke HFC-134a (1,1,1,2-tertafluorethaan, GWP = 120). Goedkopere, ongeregelde airco's werken met een 'fixed displacement compressor' (FDC), maar het aandeel van geregelde airco's met een 'variable displacement compressor' (VDC) neemt toe. In 2006 is Europese wetgeving ingesteld die een limiet stelt aan de hoeveelheid koelmiddel die per jaar uit dergelijke systemen mag lekken. Afhankelijk van het type systeem is die beperkt tot 40 cq. 50 gram per jaar.

Op dit moment wordt er enerzijds gewerkt aan verbetering van het rendement van airco's op HFC-134a en anderzijds aan systemen op basis van alternatieve koelmiddelen. Een belangrijke kandidaat is R744, beter bekend als CO₂. (TNO 2006a) verwacht dat na 2015 de markt volledig zal zijn overgegaan op R744 systemen.

9.4.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

In (TNO, 2002) is een inschatting gemaakt van het meerverbruik van auto's als gevolg van het gebruik van airco's afhankelijk van de regio en bijbehorende klimatologische omstandigheden. Voertuigen met een airco verbruiken in Noord-Europa 0,21 l/100 km meer, in Midden-Europa 0,28 l/100km en in Zuid-Europa 0,44 l/100km. Dit komt overeen met 5, 7, resp. 11 gCO₂/km uitgaande van 65% benzinevoertuigen en 35% diesels. Tabel 10 geeft een overzicht van de relatieve rendementen en additionele emissies van de verschillende systemen zoals hierboven genoemd.

9.4.3 Voor- en nadelen

De verschillende alternatieve airco systemen hebben geen specifieke voor- of nadelen voor de gebruiker. R744 systemen hebben t.o.v. HFC-gebaseerde systemen twee voordelen: ze zijn efficiënter en de GWP van de koelvloeistof is 1 zodat de toch al beperkte lekkages geen significante bijdrage leveren aan de totale broeikasgasemissies van het voertuig.

Tabel 10 Indirecte TTW CO₂-emissies, relatieve efficiency en additionele kosten van verschillende typen airco's

	add. manuf. costs	relative efficiency	indirect TTW CO ₂ -emission [g/km]							
			[€]	[%]	2006	2007	2008	2009	2010	2011
R134a FDC 40g/y baseline	0	100%	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76
R134a VDC 40g/y (= BL industry)	35	70%	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44
average R134a system			6.60	6.48	6.37	6.25	6.13	6.02	5.90	
improved R134a VDC 40g/y	75	53%	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08	4.08
Alt R744	135	56%			4.35	4.35	4.35	4.35	4.35	4.35
Alt R744 improved	195	42%			3.26	3.26	3.26	3.26	3.26	3.26

	add. manuf. costs	relative efficiency	indirect TTW CO ₂ -emission [kg/y]							direct refrigerant emission	
			[€]	[%]	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
R134a FDC 40g/y baseline	0	100%	124	124	124	124	124	124	124	124	52
R134a VDC 40g/y (= BL industry)	35	70%	87	87	87	87	87	87	87	87	52
average R134a system			106	104	102	100	98	96	94	92	52
improved R134a VDC 40g/y	75	53%	65	65	65	65	65	65	65	65	52
Alt R744	135	56%			70	70	70	70	70	70	0
Alt R744 improved	195	42%			52	52	52	52	52	52	0

*) annual mileage = 16000 km

Bron: TNO, 2006a.

9.4.4 Vermijdingskosten

Resultaten uit (TNO, 2006a) zijn weergegeven in Tabel 11. De vermijdingskosten van verschillende systemen vergeleken met het allereenvoudigste fixed displacement systeem op basis van R134a zijn minder dan 100 €/ton en in een aantal gevallen zelfs negatief. Op het gebied van airco's vinden echter autonome ontwikkelingen plaats. De komende decennia zullen ook zonder specifiek beleid R134a FDC systemen vervangen worden door R134a VDC systemen (die door betere regelbaarheid tot een hoger comfort leiden en lagere motorbelasting) en voorts wordt verwacht dat CO₂-systemen (R744) autonoom zullen worden toegepast. Op lange termijn wordt het reductiepotentieel dus bepaald door verbeterde R744 systemen en zullen de vermijdingskosten t.o.v. de baseline (gemiddelde systeem op de markt als gevolg van autonome trends) tot ver boven de 100 €/ton stijgen. Verder neemt het absolute reductiepotentieel af als auto's in de toekomst efficiënter worden. Een berekening op basis van een olieprijs van 36 €/bbl en toepassing van de hiervoor beschreven technische opties m.u.v. hybride aandrijving komt uit op vermijdingskosten boven de 200 €/ton.



Tabel 11 CO₂-vermijdingskosten van verschillende verbeterde of alternatieve airco systemen in vergelijking met een baseline system gebaseerd op R134a en een 'fixed displacement compressor' (linker deel) en vergeleken met het gemiddelde system zoals naar verwachting wordt verkocht in 2008 (mix van R134a FDC en R134a VDC systemen)

	fuel price in [€/l]				fuel price in [€/l]			
	0.21	0.30	0.41	0.60	0.21	0.30	0.41	0.60
	abatement costs compared to R134a FDC baseline 40g/y				abatement costs compared to average system for 2008 in baseline scenario			
	[€/tonne]	[€/tonne]	[€/tonne]	[€/tonne]	[€/tonne]	[€/tonne]	[€/tonne]	[€/tonne]
R134a FDC 40g/y baseline	---	---	---	---	---	---	---	---
R134a VDC 40g/y (=BL industry)	16	-7	-36	-86	16	-7	-36	-86
improved R134a VDC 40g/y	41	18	-11	-61	56	33	4	-45
Alt R744	73	60	44	17	90	80	67	46
Alt R744 improved	93	78	60	30	111	99	83	57

annual mileage = 16000 km

vehicle lifetime = 13 y

IR = 4%

Bron: TNO, 2006a.

9.4.5 Instrumenteerbaarheid

Ontwikkeling en toepassing van zuinige airco's kan het beste op EU-niveau worden gestimuleerd of afgedwongen. Het gaat daarbij overigens om het stimuleren van vernieuwingen bovenop de trends die al autonoom plaatsvinden (groei van het aandeel VDC-systemen en overgang naar R477). Een belangrijk probleem op dit moment is dat enerzijds het meerverbruik van een airco niet wordt gemeten op de typekeuringstest en anderzijds er ook geen eenvoudige manier beschikbaar is waarmee het energiegebruik van airco's wel in de typekeuring kan worden opgenomen. De in (TNO, 2004a) ontwikkelde methode is wel geschikt om trends te monitoren in het gemiddeld gebruik van airco's op basis van metingen aan een voldoende grote steekproef, maar is onvoldoende nauwkeurig om bij meting aan een individueel voertuig statistisch significante uitspraken te kunnen doen. Voordat zuinige airco's kunnen worden gestimuleerd is dus eerst verdere ontwikkeling van testmethoden noodzakelijk.

9.4.6 Synergie met andere gebieden

Gebruik van de airco leidt tot hogere belasting van de motor en kan onder bepaalde omstandigheden (bij snelle acceleratie, rijden op helling of trekken van een zware last, de motor in vollastverrijking brengen. Dit leidt tot sterk verhoogde uitlaatgasemissies. In de Nederlandse emissiefactoren is een zgn. airco-toeslag opgenomen. Zuiniger airco's zullen deze toeslag mogelijk verkleinen.

9.5 Overige technische maatregelen

Verdergaande oplossingen m.b.t. voertuigaandrijving, in het bijzonder brandstofcellen en elektrische aandrijving, worden besproken in hoofdstuk 13. Deze opties koppelen een hoog energetisch rendement van de aandrijflijn aan de mogelijkheid om energie uit een groot aantal al dan niet duurzame primaire bronnen te gebruiken.

Een belangrijke maatregel voor de langere termijn om energiegebruik van voertuigen te verminderen is de toepassing van geavanceerde lichtgewichtmaterialen. Zoals hierboven reeds gemeld is er vooralsnog te weinig bekend van kosten op lange termijn en de mogelijkheden voor toepassing in serieproductie (beide onder de voorwaarde van compliance met huidige en toekomstige (bots)veiligheidseisen) om deze optie goed te kunnen vergelijken met de andere hierboven beschreven opties.

9.6 **Inschatting van absolute reductiepotentiëlen voor personenauto's op basis van het GE-scenario**

In Tabel 12 wordt het resultaat weergegeven van een indicatieve berekening van de absolute reductiepotentiëlen in 2030 van toepassing in Nederland van een aantal van de in dit hoofdstuk beschreven opties om de CO₂-emissies van personenauto's te reduceren. De tabel bevat ook resultaten voor verhoogde bijmenging van 2^e generatie biobrandstof (20% op basis van energie-inhoud) en voor toepassing van brandstofcellen op waterstof in een deel van de vloot. Deze twee opties worden nader besproken in hoofdstuk 13. Om de effecten van toepassing van biobrandstoffen en duurzaam geproduceerde waterstof te kunnen verrekenen is het reductiepotentieel berekend op basis van geschatte WTW CO₂-emissies. Voor conventionele benzine/diesel zijn deze een factor 1,183 hoger dan de directe TTW CO₂-emissies (op basis van gegevens uit (Concawe, 2006)).

Uitgangspunt voor de berekening is de ontwikkeling van volume en CO₂-emissies zoals beschreven in het WLO GE-scenario ((MNP, 2006a), zie Bijlage B). Reductiepotentiëlen voor verschillende opties worden gestapeld toegepast op de gemiddelde CO₂-emissiefactor voor personenauto's in 2030 volgens het GE-scenario (194 g/km).

Belangrijk om daarbij op te merken is dat een deel van het reductiepotentieel van de in dit hoofdstuk beschreven technische opties gebruikt wordt om autonome trends te compenseren. Zoals Figuur 57 laat zien is de gemiddelde emissiefactor van personenauto's in het GE scenario in 2030 ongeveer gelijk aan die in 2005. De afgelopen decennia zijn auto's gemiddeld steeds groter en m.n. zwaarder geworden, deels als gevolg van wettelijk verplichte veiligheidsmaatregelen en deels als gevolg van comfortverhogende aspecten. Wanneer deze trend ook naar de toekomst wordt doorgetrokken betekent dit dat ook voor het op gelijk niveau houden van de gemiddelde CO₂-emissie van auto's toepassing van CO₂-reducerende technieken nodig is. In de berekeningen is voor personenauto's uitgegaan van een autonome gewichtstoename van gemiddeld 1% per jaar tussen 2005 en 2030. Op basis van een ook in (TNO, 2006) gebruikte formule is de resulterende toename van CO₂-emissies bepaald (een stijging naar 221 g/km in 2030). Vervolgens is verondersteld dat deze stijging wordt gecompenseerd door toepassing van een deel van het potentieel van opties die het rendement van de verbrandingsmotor verbeteren. Van het totale potentieel van 22% voor deze maatregel is dan voor verdere reductie t.o.v. de GE-emissiefactor van 194 g/km nog maar een kleine 10% beschikbaar.



Tabel 12 Indicatieve schatting van reductiepotentiëlen van maatregelen bij personenauto's, t.o.v. baseline op basis van GE-scenario (toelichting zie tekst)

Personenauto's

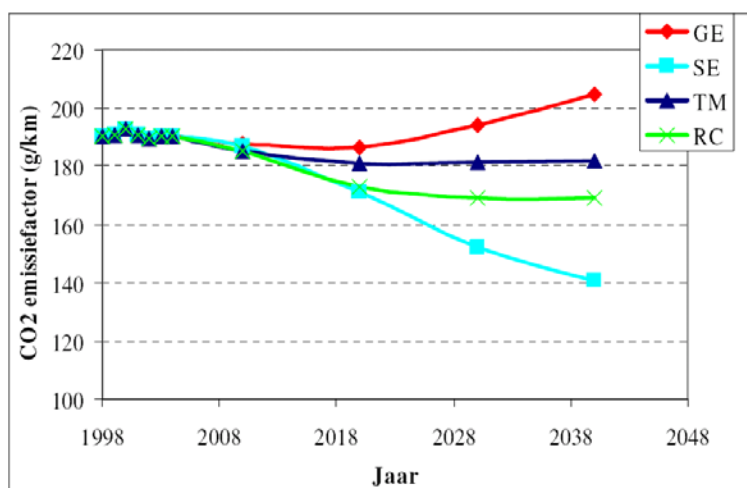
reductie-optie	TTW reductie [%]	WTT reductie [%]	2030 baseline TTW emissie [g/km]	aandeel in vloot [%]	reductie- potentieel WTW [kton]	over- blijvende emissie WTW 2030 [kton]	reductie t.o.v. GE baseline 2030 [%]	reductie t.o.v. 2005 [%]
GE-baseline			194,0			34467		24250
<i>verbeterde ICE (totaal)</i>	22,0%	0,0%						
<i>verbeterde ICE (compensatie gewicht)</i>	12,3%	0,0%	221,2	100%				
TPMS	2,5%	0,0%	194,0	100%	862	33605	3%	-39%
lichtgewicht conventioneel	6,0%	0,0%	189,2	100%	2016	31589	8%	-30%
verbeterde ICE (resterend potentieel)	9,7%	0,0%	177,8	100%	3074	28514	17%	-18%
LRRT	3,0%	0,0%	160,5	100%	855	27659	20%	-14%
LVL	0,6%	0,0%	155,7	100%	166	27493	20%	-13%
efficiënte airco	2,5%	0,0%	154,8	100%	687	26805	22%	-11%
full hybrid aandrijving	18,0%	0,0%	150,9	90%	4342	22463	35%	7%
zuinig rijden incl. GSI	5,0%	0,0%	126,5	100%	1123	21340	38%	12%
bijmengen 20% 2e gen. biobrandstof	0,0%	17,3%	120,1	100%	3685	17655	49%	27%
waterstofvoertuigen	48,6%	50,0%	195,0	20%	1752	15903	54%	34%

In Tabel 12 zijn technische maatregelen gestapeld in volgorde van vermijdingskosten. Het relatieve reductiepotentieel van een maatregel wordt steeds toegepast op de in dezelfde rij vermelde CO₂-emissiefactor in de kolom "baseline TTW-emissie", die het resultaat is van de daarboven reeds toegepaste reducties t.o.v. de GE-basisemissiefactor voor 2030. Het totale reductiepotentieel op parkniveau van technische opties die toepasbaar zijn op benzine- en dieselveertuigen (d.w.z. alle opties in Tabel 12 behalve zuinig rijden, biobrandstoffen en waterstofvoertuigen) is zo'n 35% t.o.v. de GE-baseline in 2030, wat neerkomt op een reductie van 7% t.o.v. 2005.

Het potentieel van zuinig rijden en biobrandstoffen is ingeschat uitgaande van voertuigen waarop alle genoemde technische maatregelen zijn toegepast. Voor biobrandstoffen is verondersteld dat 20% van de gebruikte benzine wordt vervangen door ethanol uit stro, houtafval en geteeld hout. Daarnaast wordt 20% van de diesel gesubstitueerd door BTL-diesel (biomass-to-liquid op basis van Fischer-Tropsch proces) geproduceerd uit biomassa-afval, houtafval en geteeld hout.

Voor brandstofcelvoertuigen is verondersteld dat ze in 2030 20% van het park vervangen. De gebruikte waterstof is verondersteld voor 50% te zijn geproduceerd uit fossiele bronnen in combinatie met CO₂-afvang en opslag (CCS), en voor de andere 50% deels via thermische productie uit aardgas (zonder CCS) en houtachtige biomassa en deels via elektrolyse op basis van windenergie. Het potentieel van deze techniek is toegepast relatief t.o.v. een toekomstig conventioneel voertuig waarop wel een aantal CO₂-reducerende maatregelen op voertuigniveau zijn toegepast, maar geen verbeteringen aan de motor of hybride aandrijving. Vanzelfsprekend zijn ook andere aannames mogelijk ten aanzien van de productieketens voor waterstof en het aandeel van waterstofvoertuigen in de vloot leidend tot andere overall CO₂-emissies. De hier gepresenteerde getallen dienen als voorbeeld.

Figuur 57 Ontwikkeling van de gemiddelde CO₂-emissiefactor (in de praktijk) van het personenautopark volgens verschillende WLO-scenario's



Bron: MNP, 2006a.

N.B. Voor een toelichting op de scenario's zie Bijlage B.

De getallen voor technische maatregelen aan voertuigen en voor zuinig rijden zijn afgeleid van (TNO, 2006a). De getallen voor 2^e generatie biobrandstoffen, waterstof en brandstofcelvoertuigen zijn afgeleid van (Concawe, 2006).

9.7 Specifieke beleidsmaatregelen voor zuinige personenauto's

Hierboven is voor een aantal zeer specifieke technische opties al aangegeven hoe ze geïncorporeerd kunnen worden. Hieronder wordt nader ingegaan op specifiek beleid m.b.t. zuinige auto's in brede zin.

Op dit moment wordt de ontwikkeling en verkoop van zuinige voertuigen in Europa op drie manieren gestimuleerd (zie ook paragraaf 9.8.2):

- een convenant tussen de Europese Commissie en ACEA/JAMA/KAMA om de gemiddelde CO₂-emissies van nieuwe voertuigen te reduceren tot 140 g/km in 2008/9;
- fiscale stimulering van zuinige voertuigen door nationale overheden (bijv. BPM-differentiatie zoals in juli 2006 in NL ingevoerd);
- brandstofverbruikslabelling, waarmee tijdens het aankoopproces brandstofverbruik en CO₂-emissie onder de aandacht van consumenten wordt gebracht.

In het algemeen kan de toepassing van zuinige auto's worden gestimuleerd of afgedwongen m.b.v. de volgende beleidsmaatregelen:

- CO₂-emissienormen, opgelegd op het niveau van voertuigen of bijv. van verkoopgemiddelden van fabrikanten;
- subsidies op zuinige voertuigen;
- verschillende vormen van beprijzing:
 - verhoging van de brandstofaccijns;
 - CO₂-differentiatie van aanschafbelasting of houderschapsbelasting;
 - CO₂-differentiatie van kilometerheffing.



- opname van personenauto's in een gesloten of open emissiehandels-systeem.

Beprijzing in de vorm van CO₂-differentiatie van bestaande belastingen of van kilometerheffing kan budgetneutraal worden uitgevoerd (zuinige auto's betalen minder en minder zuinige betalen meer), of kan zo worden ingericht dat de netto kosten (gemiddeld) stijgen. Beprijzingsmaatregelen worden nader toegelicht in paragraaf 16.2.

Daarnaast is stimulering van R&D mogelijk zinvol om verschillende energiebesparende technieken (m.n. voor de wat langere termijn) verder tot wasdom te brengen en om innovaties te stimuleren waarmee de kosten van deze opties verlaagd kunnen worden. Dit gebeurt reeds in de VS, Japan en Europa (Kaderprogramma's) en kan worden voortgezet. Wel lijkt het zinnig om in Europese programma's er strenger op toe te zien dat de gestelde doelen ook gehaald worden. Daarbij kan het Amerikaanse systeem, waarbij de deliverables van de gesubsidiëerde R&D-projecten door onafhankelijke overheidslabs getest worden, als voorbeeld dienen.

9.7.1 Overwegingen m.b.t. CO₂-emissienormen voor personenvoertuigen

Bepaling van brandstofverbruik en CO₂-emissie maken onderdeel uit van de typekeuringstest van personenauto's. In tegenstelling tot luchtverontreinigende emissies bestaat er echter geen Europese limiet voor de CO₂-emissie van personenauto's. Op 7/2/2007 is er echter wel nieuw beleid aangekondigd waarin een emissielimiet van 130 g/km is opgenomen (COM(2007) 19, zie ook paragraaf 9.8.2). De manier waarop deze limiet wordt geïmplementeerd (bijv. limiet op voertuigniveau of op verkoopgemiddelde van fabrikanten) is echter nog onderwerp van studie.

Omdat CO₂-emissies sterk correleren met voertuigeigenschappen (o.a. luchtweerstand via stroomlijn en frontaal oppervlak, massa, motorvermogen, uitrustingsniveau) zou een uniforme CO₂-emissielimiet op voertuigniveau leiden tot ernstige marktverstoringen. Veel auto's zouden niet meer mogen worden verkocht (denk aan sportwagens, SUVs, MPVs, etc.) Een uniforme limiet zou wel kunnen worden opgelegd op het niveau van fabrikanten wanneer deze betrekking heeft op de verkoopgemiddelde CO₂-emissie. Daarbij kan het zinvol zijn om dit te combineren met een (gesloten) emissiehandelssysteem waarbij fabrikanten onderling emissiecredits (bijv. in g/km op basis van de typekeuringstest) kunnen verhandelen (IEEP, 2005) om zo de gewenste emissiereductie kostenoptimaal over fabrikanten en marktsegmenten te kunnen verdelen.

Ook zou de limiet gedifferentieerd kunnen worden naar een parameter die de 'utiliteit' of gebruikswaarde van het voertuig representeert, waarbij grotere of sportievere voertuigen meer mogen emitteren, maar bij gegeven utiliteit fabrikanten wel worden uitgedaagd om zo zuinig mogelijke voertuigen te produceren. Deze emissielimiet kan worden toegepast op individuele voertuigen, maar ook op het niveau van het verkoopgemiddelde van fabrikanten, al dan niet in combinatie met

een handelssysteem zoals hierboven beschreven. Een derde mogelijkheid is het stellen van een reductiedoel per fabrikant in termen van een percentage t.o.v. de verkoopgemiddelde CO₂-emissie in een referentiejaar, eventueel ook gecombineerd met een onderling handelssysteem.

9.8 Voorbeelden van bestaand beleid m.b.t. personenauto's

9.8.1 Nederland

De Kyoto-doelstelling voor Nederland voor 2012 wordt gehaald zonder dat een sterke bijdrage van de verkeerssector nodig is. De belangrijkste elementen van Nederlandse CO₂-beleid voor de transportsector zijn brandstofverbruikslabelling, BPM-korting voor personenauto's met een A- en B-label, extra BPM-korting voor hybride voertuigen, stimulering van 'Het Nieuwe Rijden' en accijnsverlaging voor bijmenging van biobrandstoffen, vooruitlopend op een verplicht bijmengpercentage vanaf 2007.

Het klimaatbeleid dat in Nederland is geïmplementeerd in de sector verkeer komt deels voort uit de inspanningen om de Kyoto-doelstellingen te halen (zie de Uitvoeringsnota Klimaatbeleid), deels gaat het om de implementatie van EU-richtlijnen zoals de biobrandstoffenrichtlijn. Vóór 1995 was er nog geen sprake van emissiedoelen of klimaatbeleid in de sector verkeer. Daarnaast is echter wel fiscaal beleid, dat niet primair is gericht op klimaatbeleid, effectief geweest in de reductie van de CO₂-emissies.

Het huidige klimaatbeleid is erop gebaseerd dat de Kyoto-doelstelling voor Nederland wordt gehaald zonder dat een sterke bijdrage van de verkeerssector nodig is. De verkeerssector hoeft niet aan internationale CO₂-doelen te voldoen, maar op nationaal niveau is er wel een streefcijfer afgesproken (38 Mton CO₂ in 2010).

Hybride voertuigen waren sinds eind jaren '90 vrijgesteld van BPM en worden ook lager aangeslagen voor de wegenbelasting. Per 1 juli 2006 is deze regeling vervangen door een iets lagere BPM-korting als onderdeel van een integrale CO₂-differentiatie van de BPM. In 2002 gaf de overheid € 1.000 belastingvoordeel voor A-label voertuigen en € 500 voor B-label voertuigen. Deze maatregel werd echter binnen een jaar weer afgeschaft. De aandelen van de klassen stegen van 0,3% tot 3,2% voor A-label voertuigen en van 9,5% tot 16,1% voor B-label voertuigen (CE, 2005a).

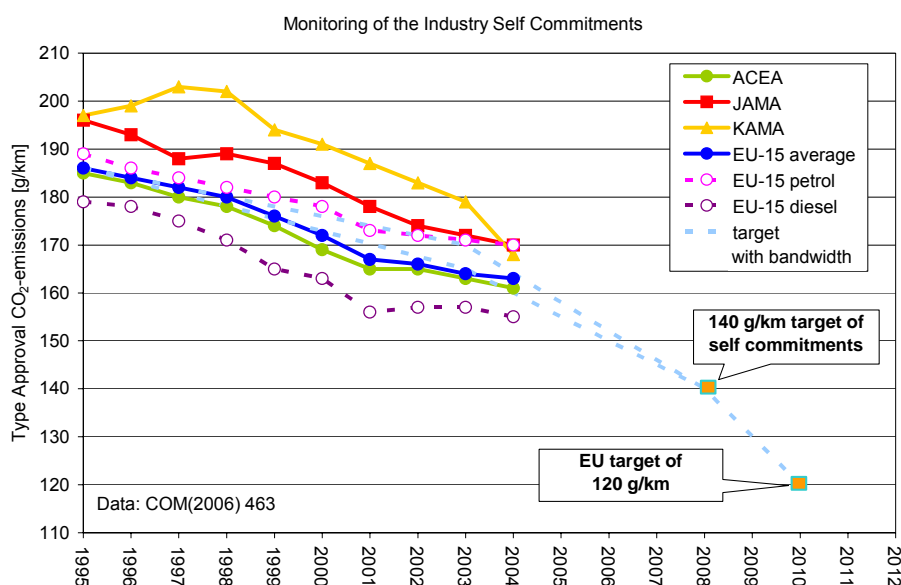
Als we kijken naar overig (m.a.w. niet klimaat)beleid, kunnen we concluderen dat de relatieve hoge belastingen op auto's in Nederland, en op brandstof in heel Europa er overtuigend toe hebben geleid dat auto's in Europa veel zuiniger zijn dan auto's in bijv. de Verenigde Staten. Dit fiscale beleid is niet gericht op beperking van brandstofverbruik of CO₂-emissie maar heeft er wel effectief toe geleid dat Europa zich wat betreft CO₂-emissies door het wegverkeer in een gunstiger situatie bevindt dan veel andere regio's in de wereld (denk aan de VS).



9.8.2 Europese Commissie

Het huidige EU-beleid m.b.t. CO₂-reductie in personenauto's heeft als doel om de gemiddelde CO₂-emissie (gemeten op typekeuringstest) van nieuwe auto's te reduceren tot 120 g/km in 2010. Het beleid rust op 3 pijlers. De belangrijkste pijler is een convenant tussen de EU en autofabrikanten, waarin de 3 associaties ACEA, JAMA en KAMA beloven om tussen 1995 en 2008/9 de gemiddelde CO₂-emissie van nieuw verkochte auto's te reduceren van 186 g/km naar 140 g/km. De vooruitgang die geboekt is onder dit convenant is geïllustreerd in Figuur 58. Een belangrijke conclusie van de monitoring van het convenant is dat er door technische maatregelen significante reducties zijn gerealiseerd, maar dat het reductietempo de laatste paar jaar afvlakt, terwijl het eigenlijk had moeten worden opgevoerd. Daardoor wordt het steeds minder waarschijnlijk dat het gestelde doel van 140 g/km in 2008/9 gehaald wordt.

Figuur 58 Monitoring van de ontwikkeling van de gemiddelde CO₂-emissie van nieuw verkochte personenauto's onder het convenant tussen de Europese Commissie en ACEA, JAMA en KAMA



De andere twee pijlers zijn consumentenvoorlichting (m.b.v. brandstofverbruikslabelling op basis van Directive 1999/94/EC) en fiscale maatregelen, geïmplementeerd door lidstaten om consumenten te beïnvloeden tot de aanschaf van zuiniger voertuigen (COM(2005) 261).

Veertien van de EU-15 landen hebben een vorm van brandstofverbruikslabelling ingevoerd. De meeste landen hanteren een absoluut label. Alleen Spanje en Nederland hebben een relatief label dat gebaseerd is op een onderlinge vergelijking van voertuigen binnen eenzelfde grootteklasse. Directive 1999/94/EC, ingevoerd in 1999, verplicht alle lidstaten om ervoor te zorgen dat in de showroom een brandstofverbruiks- of CO₂-label duidelijk zichtbaar wordt getoond op nieuwe voertuigen, en stelt minimum eisen om de consistentie van het label te garande-

ren. Het label moet ook vermelden dat er een gratis brandstofverbruiksoverzicht beschikbaar is, dat CO₂ het belangrijkste broeikasgas is en dat rijstijl en andere niet-technische factoren van invloed zijn op brandstofverbruik en CO₂-emissies. Een deel van deze informatie moet ook worden vermeld in reclame-uitingen.

CO₂-differentiatie van voertuigbelastingen wordt pas sinds kort in een beperkt aantal landen toegepast, en bevindt zich dus nog in een pril stadium.

Recent is door de Europese Commissie het CO₂-beleid m.b.t. personen- en bestelauto's geëvalueerd. In februari is een communicatie uitgebracht (COM(2007) 19) waarin de grote lijnen voor het voorgenomen beleid voor na 2008 worden geschetst. Het doel blijft om de gemiddelde CO₂-emissie van nieuwe personenauto's in 2012 op 120 g/km te krijgen¹². Een deel daarvan moet worden gerealiseerd door een CO₂-norm, die inhoudt dat de gemiddelde CO₂-emissie van nieuw-verkochte auto's zoals gemeten op de typekeuringstest in 2012 niet meer dan 130 g/km mag bedragen. De manier waarop deze norm wordt geïmplementeerd is momenteel nog onderwerp van studie. Opties zijn verschillende vormen van normstelling op voertuigniveau (bijvoorbeeld gedifferentieerd naar de grootte van het voertuig) en normen die betrekking hebben op de verkoopgemiddelde CO₂-emissie per fabrikant. De overige 10 g/km worden ingevuld d.m.v. een aantal elementen uit de zgn. 'Integrated Approach':

- eisen aan het rendement van air conditioning systemen;
- verplichte toepassing van tyre pressure monitoring systems;
- normstelling voor de rolweerstand van banden voor personen- en bestelauto's in de EU;
- gebruik van schakelindicatoren (gear shift indicators);
- maatregelen voor verlaging van het brandstofgebruik bij bestelauto's;
- verhoogde toepassing van biobrandstoffen en eisen aan de milieuprestatie van biobrandstoffen.

Het concept van de Integrated Approach is bedacht door ACEA en was het onderwerp van de CARS21 Working Group, die extra gewicht heeft gegeven aan deze aanpak en haar op de Europese agenda heeft gezet. De essentie van de 'Integrated Approach' is dat:

- een CO₂-doelstelling voor 2012 kan kosteneffectiever worden bereikt door een combinatie van technische en niet-technische maatregelen die moeten worden uitgevoerd door de verschillende betrokken stakeholders (auto-industrie, producenten van brandstoffen en smeermiddelen, de bandenindustrie, consumenten, overheden, etc.);
- er vanuit milieuperspectief een groter CO₂-reductiepotentieel bestaat wanneer meer elementen uit het systeem worden onderworpen aan reductie-maatregelen;
- grotere coherentie van beleid meer ruimte biedt voor synergie en voor het vermijden van perverse effecten;
- omschakelingskosten indien van toepassingen kunnen worden gedragen door een groter aantal en een bredere groep stakeholders.

¹² D.w.z. op een niveau dat equivalent is met de praktijkemissies van een voertuig dat 120 g/km emitteert op de typekeuringstest.



Naast bovengenoemde maatregelen uit (COM(2007) 19) kunnen ook het promoten van een energiezuinige rijstijl, smeerolie met lage viscositeit voor bestaande voertuigen, en maatregelen in de sfeer van verkeersmanagement onderdeel uitmaken van de 'Integrated Approach'.

White Paper on Transport Policy

In het EU 'White Paper on Transport' ('European transport policy for 2010: time to decide' (COM(2001) 370)) wordt energie-efficiëntie nauwelijks genoemd. Het paper wordt momenteel gereviewed. In een recente communicatie van de Europese Commissie over deze review (COM(2006) 314) wordt het verbeteren van energie-efficiëntie wel genoemd als een belangrijke factor in het energiebeleid van de EU: 'A European energy policy which aims at ensuring competitiveness, security of supply and environmental protection has to focus, inter alia, on further transport policies which reduce energy consumption by improving fuel efficiency on the vehicle side and gradually replacing oil by other fuels be it bio-fuels, natural gas, hydrogen, electricity or others.' Ook wordt vermeld dat er grote R&D inspanningen en investeringen nodig zijn op het gebied van transport en energie.

Green Paper on Energy Efficiency

In 2005 werd het EU Green Paper over energie-efficiëntie ('Doing more with less') gepubliceerd. In dit Green Paper wordt verbetering van de energie-efficiëntie in transport voornamelijk geassocieerd met modal shift, optimalisatie van transport en transport management en met road pricing.

9.8.3 Verenigd Koninkrijk

In het Verenigd Koninkrijk is de wegenbelasting (Circulation Tax) gekoppeld aan de absolute CO₂-emissie van voertuigen. Voor lease-auto's is de bijtelling afhankelijk gemaakt van de CO₂-emissie.

9.8.4 Frankrijk

In Frankrijk bevat de aanschafbelasting voor zakenauto's een deel dat afhankelijk is van de CO₂-emissie in gram per kilometer. Deze toeslag is een functie van het energielabel, en loopt op van € 2 per g/km voor A-label voertuigen tot € 19 per g/km voor G-label voertuigen.

9.8.5 Denemarken

In Denemarken is de wegenbelasting gedifferentieerd in 24 schalen die gerelateerd zijn aan het brandstofverbruik. Dit heeft geresulteerd in een significante toename van het aandeel voertuigen met lage CO₂-emissies in de recente verkopen van nieuwe auto's.

9.8.6 USA

CAFE

In de Verenigde Staten zijn als onderdeel van de 1975 Energy Policy and Conservation Action de zgn. corporate average fuel economy (CAFE) standards ingevoerd. Tussen 1978 en 1987 heeft CAFE geresulteerd in een verbetering van het gemiddeld brandstofverbruik van Amerikaanse personenauto's van 15 mpg naar 28 mpg (miles per gallon: 1 mpg = 0,425 km/l). Voor bestelauto's ('light duty trucks' in de VS) zijn de doelen minder ambitieus en is het verbruik verbeterd van 14 mpg naar 21 mpg. Door een gebrek aan politieke wil werden de CAFE standards na 1987 niet meer aangescherpt, waardoor het verbruik van personen- en bestelauto's sindsdien min of meer constant is gebleven. Het gemiddeld verbruik van Amerikaanse voertuigen is zelfs toegenomen door een toename van het aandeel van SUVs in de vloot. Deze voertuigen vallen veelal onder de categorie 'light duty trucks'.

Californië

In september 2004 heeft de Californian Air Resources Board een regulering van de broeikasgasemissies van nieuwe auto's goedgekeurd. Grote fabrikanten moeten voor de voertuigen die ze in Californië verkopen voldoen aan een vlootgemiddelde broeikasgasemissionorm (in gram CO₂-equivalent per kilometer). Daarbij is een zekere mate van 'banking' over de jaren heen toegestaan. De regeling is van toepassing op personenauto's en bestelauto's en reguleert naast CO₂-emissies ook andere broeikasgassen (CH₄ en N₂O) en de emissies van CO₂ en fluorkoolwaterstoffen als gevolg van het gebruik van airco's, emissies bij de sloop en upstream emissies gerelateerd aan de productie van brandstoffen. De wetgeving zal ingaan voor voertuigen van modeljaar 2009. Er wordt verwacht dat de normen (zie Tabel 13) grotendeels gehaald kunnen worden met beschikbare technologie en zonder down-sizing van voertuigen.

Tabel 13 Californische limieten voor de vlootgemiddelde broeikasgasemissies van nieuwe voertuigen

Tier	Year	CO ₂ -equivalent emission standard (g/mi)	
		PC/LDT1 (Passenger cars and small trucks/SUVs)	LDT2 (Large trucks/SUVs)
Near-term	2009	323	439
	2010	301	420
	2011	267	390
	2012	233	361
Mid-term	2013	227	355
	2014	222	350
	2015	213	341
	2016	205	332

Stimulering van R&D

In 1993 werd het Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV) opgericht. PNGV was een samenwerkingsprogramma tussen overheidsagentschappen en de autofabrikanten Chrysler, Ford en GM met het doel om voor productie in 2004 een betaalbare middenklasse sedan te ontwikkelen met een brandstof-



verbruik van 80 mpg (2,94 l/100 km). In 2000 presenteerden alle drie de fabrikanten hun prototypes aan de pers en toenmalig vice-president Al Gore. De prototypes kwamen in de buurt van het 80 mpg doel, maar bevatten zoveel exotische technologieën en materialen dat verdere ontwikkeling naar productierijpe voertuigen niet haalbaar werd geacht. De aandrijving van de drie voertuigen was gebaseerd op dieselmotoren en voldeed bovendien niet aan de EPA Tier 2 emissiestandaards. De overheid besteedde 814 miljoen dollar aan het programma. en de industrie zo'n 980 miljoen. PNGV werd gestopt en in 2002 vervangen door het Freedom Car programma. Dit is een publiek-private samenwerking gericht op de ontwikkeling van toekomstige voertuigen op waterstof, met een focus op R&D op het gebied van brandstofcellen en waterstofproductie uit duurzame bronnen.

9.8.7 Japan

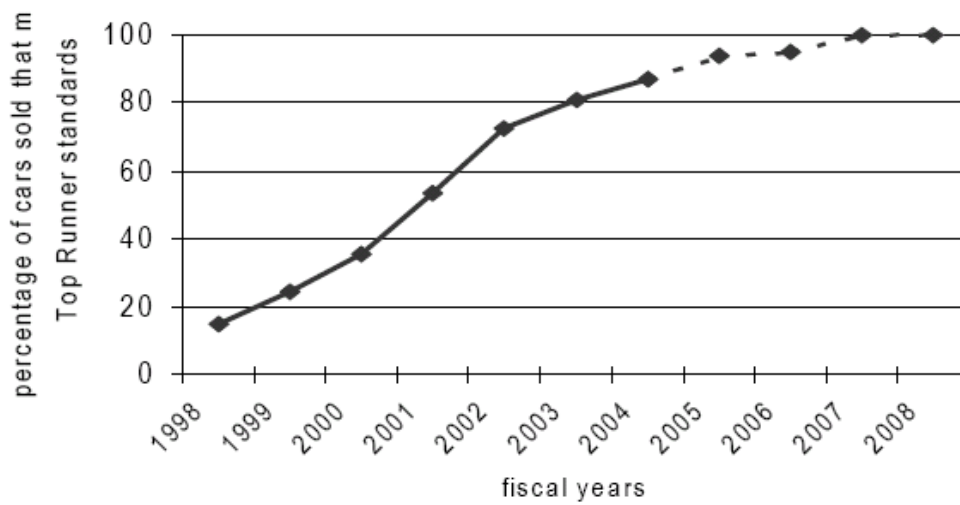
Het Japanse beleid voor stimulering van zuinige voertuigen (en ook andere producten) is gebaseerd op de zgn. 'top runner approach'. Voor verschillende gewichtsklassen zijn verbruiksnormen geformuleerd (uitgedrukt in km/l op de Japanse 10-15 test cyclus) die gebaseerd zijn op het brandstofverbruik van het meest efficiënte voertuig in die klasse op het moment waarop de norm bepaald werd. Voor benzinevoertuigen is het jaar waarin deze norm gehaald moet worden 2010, voor diesels is het 2005. Er bestaan aparte normen voor benzine en diesel. Ook voor trucks en bussen zijn er in Japan op deze wijze normen gesteld, met als doel om tussen 2002 en 2015 het brandstofverbruik met 12% te verbeteren. De normen zijn op voertuigniveau geformuleerd en zijn gerelateerd aan het gesimuleerde verbruik voor toepassing van een motor in voertuigtypen met voorgeschreven karakteristieken m.b.t. gewicht, luchtweerstand, et cetera. Een evaluatie van de Top Runner Approach is te vinden in (SEPA, 2005).

Tabel 14 Brandstofverbruiksnormen voor personenauto's onder het Japanse Top Runner Program (eenheid = km/l op de 10/15 mode test)

Parameters	Type of fuels used		
	Gasoline	Diesel	Liquefied petroleum gas
Less than 703	21.2	18.9	15.9
703-828	18.8	18.9	14.1
828-1016	17.9	18.9	13.5
1016-1266	16.0	16.2	12.0
1266-1516	13.0	13.2	9.8
1516-1766	10.5	11.9	7.9
1766-2016	8.9	10.8	6.7
2016-2266	7.8	9.8	5.9
2266 and above	6.4	8.7	4.8

Bron: SEPA, 2005.

Figuur 59 Ontwikkeling van het aandeel in de Japanse nieuwverkopen van voertuigen die voldoen aan de Top Runner verbruiksnormen



Bron: SEPA, 2005.



10 Technische maatregelen voor bestelauto's

10.1 Inleiding

Bestelauto's kunnen worden onderscheiden in drie categorieën. De lichtste categorie (class I: < 1.305 kg) is geheel gebaseerd op van personenauto's afgeleide voertuigplatforms en motoren die ook in personenauto's worden toegepast. Voor de middelzware categorie (class II: 1.305 – 1.760 kg) zijn de motoren ook veelal afgeleid van personenautomotoren. Alleen voor de zwaarste categorie (class III: > 1.760 kg) worden dedicated motoren ontwikkeld. Bestelauto's kunnen zuiniger worden gemaakt met verschillende technische opties die ook in personenauto's kunnen worden toegepast. Ongeveer tweederde van de bestelauto's in Europa rijdt op diesel, de rest op benzine (zie Tabel 15).

Hieronder wordt voor bestelauto's een aantal technische maatregelen in detail beschreven. Per maatregel wordt ingegaan op het reductiepotentieel op voertuigniveau, de kosten van de maatregel op voertuigniveau en op de kosten-effectiviteit uitgedrukt in CO₂-vermijdingskosten. Inschattingen van het totale potentieel van de maatregelen bij toepassing in de Nederlandse voertuigvloot worden gepresenteerd in 11.9.

10.2 Verbetering van voertuigrendement bij bestelauto's

10.2.1 Wat houdt de optie in?

Veel van de in paragraaf 9.2 genoemde opties voor personenauto's kunnen ook worden gebruikt om bestelauto's zuiniger te maken. Voor een beschrijving van deze technieken wordt verwezen naar paragraaf 9.2.

Hybride aandrijving is een voor bestelauto's zeer interessante optie omdat bestelauto's veelal in stedelijk gebied worden gebruikt met een groot aandeel stop & go verkeer. Het hogere gewicht van bestelauto's vergroot ook het potentieel voor terugwinning van remenergie.

10.2.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

In (TNO, 2006a) is een analyse gemaakt van het reductiepotentieel en de kosten voor een aantal pakketten van technische maatregelen die kunnen worden toegepast op bestelauto's. De pakketten zijn samengesteld uit technische maatregelen zoals die voor personenauto's zijn weergegeven in Tabel 8. Pakket 1 bevat o.a. maatregelen om wrijving in de motor te verminderen, directe inspuiting (voor benzinemotoren), mild engine down-sizing (bij diesel), een geoptimaliseerde versnellingsbak (bij benzine), verbeterde aerodynamica en lage-rolweerstandsbanden. In pakket 2 wordt daar voor benzine variabele kleppentiming en voor diesel een piloted gearbox aan toegevoegd. Voor beide wordt ook toepassing van een start-stopsysteem en milde gewichtsreductie verondersteld. In pakket 3

komt daar voor benzine een gelaagde verbranding bij en voor benzine en diesel een verbeterd koelsysteem, mild hybride aandrijving en medium gewichtsreductie. In pakket 4 wordt op benzine variable valve control toegepast en bij diesel terugwinning van energie uit de uitlaatgassen. Voor benzine en diesel wordt verder een full hybrid aandrijflijn toegepast, een elektrische waterpomp en sterke gewichtsreductie.

Figuur 60 geeft de resultaten in de vorm van kostencurves voor verschillende klassen bestelauto's op benzine en diesel. De pakketten met de hoogste reductiepotentiëlen bevatten een combinatie van motortechnische maatregelen, verbeterde transmissies, een olopende mate van gewichtsreductie en verbetering van stroomlijn en mild-hybrid of full-hybrid aandrijflijn.

10.2.3 Voor- en nadelen

De meeste opties, zoals ook in Tabel 8 genoemd voor personenauto's, kunnen worden ingezet zonder dat daarmee de prestaties of de bruikbaarheid van voertuigen wordt aangetast. De aangegeven reductiepotentiëlen zijn in ieder geval ingeschat onder die aanname. Wanneer bij toepassing van deze technieken wordt ingeleverd op prestaties zijn in een aantal gevallen hogere besparingen mogelijk.

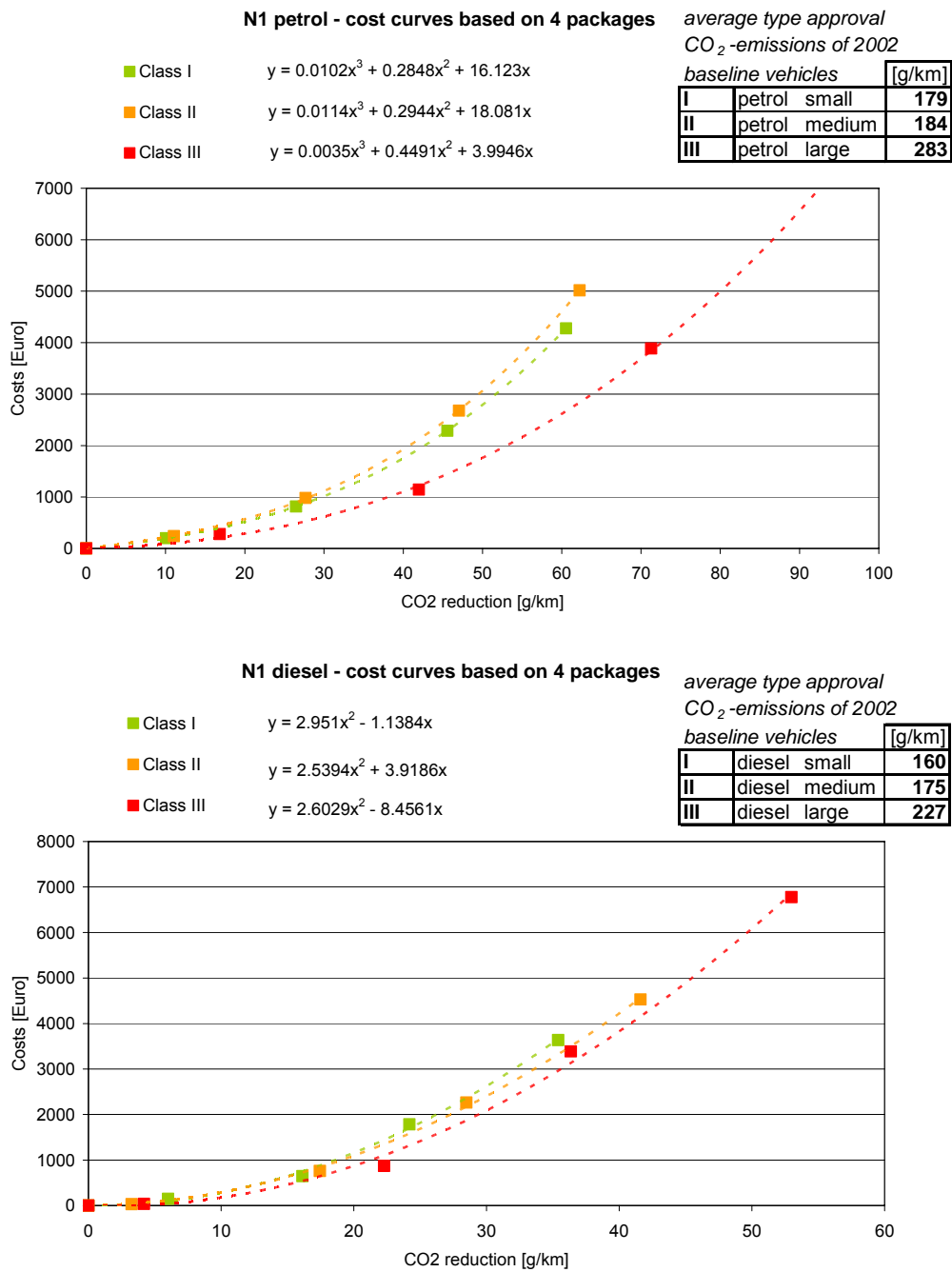
Op dit moment zijn hybride voertuigen nog niet geschikt voor het trekken van een zware aanhanger. In hoeverre toekomstige modellen daar wel geschikt voor zijn, valt vooralsnog niet te zeggen.

10.2.4 Vermijdingskosten

Met behulp van de in Figuur 60 weergegeven kostencurves zijn in (TNO, 2006a) de CO₂-vermijdingskosten berekend voor het realiseren van verschillende niveaus van reductie van de gemiddelde CO₂-emissies van Europese bestelauto's. De resultaten daarvan zijn weergegeven in Tabel 15.



Figuur 60 Kostencurves voor CO₂-reductie bij bestelauto's op benzine en diesel



Bron: TNO, 2006a.

Tabel 15 CO₂-vermijdingskosten voor verschillende niveaus van CO₂-reductie bij bestelauto's voor verschillende CO₂-reductiedoelen en verschillende olieprijsen

		Class I		Class II		Class III		average	abatement costs [€/tonne]				
		petrol	diesel	petrol	diesel	petrol	diesel		0.21 €/l	0.30 €/l	0.41 €/l	0.60 €/l	
2002 new vehicle sales		9%	19%	10%	23%	12%	27%						
2008 new vehicle sales		10%	18%	12%	21%	14%	25%						
2012 new vehicle sales		10%	17%	12%	21%	15%	25%						
2002 baseline CO ₂ -emission [g/km]		179	160	184	175	283	227	200,9					
2012 baseline CO ₂ -emission [g/km]		171	152	174	163	265	209	189,7					
least costs - 2012	15 g/km reduction	ΔCO ₂ [g/km]	22,3	7,6	20,2	7,9	32,3	10,1	15,0	6	-16	-44	-91
		CO ₂ [g/km]	149	144	154	155	232	199	175				
		Δcosts [€]	613	164	581	189	717	179	352				
		ΔCO ₂ [g/km]	43,0	16,6	40,2	18,3	60,6	20,3	30,0	63	41	14	-34
		CO ₂ [g/km]	128	135	134	145	204	189	160				
		Δcosts [€]	2027	798	1945	926	2675	898	1394				
		ΔCO ₂ [g/km]	60,0	27,4	56,5	30,8	86,5	32,4	45,0	131	108	81	34
		CO ₂ [g/km]	111	124	118	132	178	177	145				
		Δcosts [€]	4192	2178	4011	2530	5977	2463	3315				
		ΔCO ₂ [g/km]	74,9	39,2	70,7	44,6	110,2	45,9	60,0	206	184	156	109
		CO ₂ [g/km]	96	112	103	118	155	163	130				
		Δcosts [€]	7090	4498	6769	5226	10573	5093	6239				

Bron: TNO, 2006a.

N.B.: De weergegeven brandstofkosten corresponderen met olieprijsen van 25, 36, 50 en 74 €/bbl.

10.2.5 Instrumenteerbaarheid

Specifieke beleidsmaatregelen, waarmee de toepassing kan worden gestimuleerd van technieken die de CO₂-emissie van bestelauto's reduceren, worden besproken in paragraaf 10.5.

10.2.6 Synergie met andere gebieden

Voor wat betreft synergie met bijvoorbeeld maatregelen om emissies van luchtverontreinigende stoffen te verminderen, gelden voor bestelauto's dezelfde overwegingen als voor personenauto's (zie paragraaf 9.2.6).

10.3 Andere opties

Naast de bovenbeschreven voertuigtechnische maatregelen kunnen ook bij bestelauto's opties als tyre pressure monitoring systemen, lage-rolweerstandsbanden, smeerolie met lage viscositeit, en efficiënte airco's worden toegepast met relatieve reductiepotentiëlen en kosten die vergelijkbaar zijn met de toepassing in personenauto's.

10.4 Inschatting van absolute reductiepotentiëlen voor bestelauto's op basis van het GE-scenario

In Tabel 16 wordt het resultaat weergegeven van een indicatieve berekening van de absolute reductiepotentiëlen in 2030 van toepassing in Nederland van een aantal van de in dit hoofdstuk beschreven opties om de CO₂-emissies van bestelauto's te reduceren. De tabel bevat ook resultaten voor verhoogde bijmenging van 2^e generatie biobrandstof (20% op basis van energie-inhoud) en voor toepassing van brandstofcellen op waterstof in een deel van de vloot. Deze twee opties worden nader besproken in hoofdstuk 13. Om de effecten van toepassing van biobrandstoffen en duurzaam geproduceerde waterstof te kunnen verreke-



nen is het reductiepotentieel berekend op basis van geschatte WTW CO₂-emissies. Voor conventionele benzine/diesel zijn deze een factor 1,183 hoger dan de directe TTW CO₂-emissies (op basis van gegevens uit (Concawe, 2006)).

Uitgangspunt voor de berekening is de ontwikkeling van volume en CO₂-emissies zoals beschreven in het WLO GE-scenario ((MNP, 2006a), zie Bijlage B). Reductiepotentiëlen voor verschillende opties worden gestapeld toegepast op de gemiddelde CO₂-emissiefactor voor bestelauto's in 2030 volgens het GE-scenario (207,9 g/km).

Belangrijk om daarbij op te merken is dat een deel van het reductiepotentieel van de in dit hoofdstuk beschreven technische opties gebruikt wordt om autonome trends te compenseren. Net als bij personenauto's (zie paragraaf 9.6) is bij de berekening voor bestelauto's rekening gehouden met een mogelijke autonome trend in het voertuiggewicht, deels als gevolg van wettelijk verplichte veiligheidsmaatregelen en deels als gevolg van comfortverhogende aspecten en energiegebruikende accessoires. Deze trend zal minder sterk zijn dan bij personenauto's. Ondanks de zakelijke toepassing kan echter ook bij bestelauto's de laatste jaren een trend worden waargenomen van meer luxe, meer motorvermogen en zelfs van toepassing van verfraaiingen als lichtmetalen velgen. Wanneer deze trend ook naar de toekomst wordt doorgetrokken betekent dit dat voor het op gelijk niveau houden van de gemiddelde CO₂-emissie van auto's toepassing van CO₂-reducerende technieken nodig is. In de berekeningen is voor bestelauto's uitgegaan van een autonome gewichtstoename van gemiddeld 0,5% per jaar tussen 2005 en 2030. Op basis van een ook in (TNO, 2006) gebruikte formule is de resulterende toename van CO₂-emissies bepaald (de emissiefactor zou in 2030 253 g/km zijn i.p.v. 2008). De GE-baseline veronderstelt een afname van de gemiddelde CO₂-emissies van bestelauto's met zo'n 11% tussen 2005 en 2030. Verondersteld is dat compensatie van het meerverbruik door gewichtstoename en de netto reductie tussen 2005 en 2030 worden gerealiseerd door toepassing van een deel van het potentieel van opties die het rendement van de verbrandingsmotor verbeteren en een deel van het reductiepotentieel voor lichtgewicht constructie van het voertuig. Hierdoor is voor verdere reductie ten opzichte van de 2030 emissiefactor door verbeteringen aan de motor nog maar 1% van het totale potentieel van 16% over en voor reducties door middels van gewichtsbesparing nog maar iets minder dan de helft van het reductiepotentieel van 6%.

In Tabel 16 zijn technische maatregelen gestapeld in volgorde van vermijdingskosten. Het relatieve reductiepotentieel van een maatregel wordt steeds toegepast op de in dezelfde rij vermelde CO₂-emissiefactor in de kolom "baseline TTW-emissie", die het resultaat is van de daarboven reeds toegepaste reducties t.o.v. de GE-basisemissiefactor voor 2030. Het totale reductiepotentieel op parkniveau van technische opties die toepasbaar zijn op benzine- en dieselveertuigen (d.w.z. alle opties in Tabel 12 behalve zuinig rijden, biobrandstoffen en waterstofvoertuigen) is zo'n 26% t.o.v. de GE-baseline in 2030, wat neerkomt op een reductie van 1% t.o.v. 2005.

Tabel 16 Indicatieve schatting van reductiepotentiëlen van maatregelen bij bestelauto's, t.o.v. baseline op basis van GE-scenario (toelichting zie tekst)

Bestelauto's

reductie-optie	TTW reductie [%]	WTT reductie [%]	2030 baseline TTW emissie [g/km]	aandeel in vloot [%]	reductie- potentieel WTW [kton]	over- blijvende emissie WTW 2030 [kton]	reductie t.o.v. GE baseline 2030 [%]	reductie t.o.v. 2005 [%]
GE-baseline			207,9			6817		5126
<i>verbeterde ICE (totaal)</i>	16,3%	0,0%						
<i>lichtgewicht conventioneel (totaal)</i>	6,0%	0,0%						
<i>verbeterde ICE (compensatie gewicht)</i>	15,0%	0,0%	252,6	100%				
<i>lichtgewicht conventioneel (compensatie gewicht)</i>	3,2%	0,0%	214,7	100%				
TPMS	2,5%	0,0%	207,9	100%	170	6647	3%	-30%
lichtgewicht conventioneel (resterend potentieel)	2,8%	0,0%	202,7	100%	188	6459	5%	-26%
LRRT	3,0%	0,0%	197,0	100%	39	6420	6%	-25%
verbeterde ICE (resterend potentieel)	1,3%	0,0%	195,8	100%	193	6227	9%	-21%
LVL	2,5%	0,0%	189,9	100%	156	6072	11%	-18%
efficiënte airco	0,6%	0,0%	185,2	100%	78	5993	12%	-17%
full hybrid aandrijving	18,0%	0,0%	182,8	90%	917	5076	26%	1%
zuinig rijden incl. GSI	5,0%	0,0%	154,8	100%	254	4822	29%	6%
bijmengen 20% 2e gen. biobrandstof	0,0%	17,3%	147,1	100%	833	3990	41%	22%
waterstofvoertuigen	48,6%	86,3%	223,0	20%	403	3587	47%	30%

Het potentieel van zuinig rijden en biobrandstoffen is ingeschat uitgaande van voertuigen waarop alle genoemde technische maatregelen zijn toegepast. Voor biobrandstoffen is verondersteld dat 20% van de gebruikte benzine wordt vervangen door ethanol uit stro, houtafval en geteeld hout. Daarnaast wordt 20% van de diesel gesubstitueerd door BTL-diesel (biomass-to-liquid op basis van Fischer-Tropsch proces) geproduceerd uit biomassa-afval, houtafval en geteeld hout.

Voor brandstofcelvoertuigen is verondersteld dat ze in 2030 20% van het park vervangen. De gebruikte waterstof is verondersteld voor 50% te zijn geproduceerd uit fossiele bronnen in combinatie met CO₂-afvang en opslag (CCS), en voor de andere 50% deels via thermische productie uit aardgas (zonder CCS) en houtachtige biomassa en deels via elektrolyse op basis van windenergie. Het potentieel van deze techniek is toegepast relatief t.o.v. een toekomstig conventioneel voertuig waarop wel een aantal CO₂-reducerende maatregelen op voertuigniveau zijn toegepast, maar geen verbeteringen aan de motor of hybride aandrijving. Vanzelfsprekend zijn ook andere aannames mogelijk ten aanzien van de productieketens voor waterstof en het aandeel van waterstofvoertuigen in de vloot leidend tot andere overall CO₂-emissies. De hier gepresenteerde getallen dienen als voorbeeld.

De getallen voor technische maatregelen aan voertuigen en voor zuinig rijden zijn afgeleid van (TNO, 2006a). De getallen voor 2^e generatie biobrandstoffen, waterstof en brandstofcelvoertuigen zijn afgeleid van (Concawe, 2006).

10.5 Specifieke beleidsmaatregelen voor zuinige bestelauto's

In het algemeen kan de toepassing van energiebesparende technologie bij bestelauto's worden gestimuleerd of afgedwongen m.b.v. de volgende beleidsmaatregelen:



- CO₂-emissienormen, opgelegd op het niveau van voertuigen of bijv. van verkoopgemiddelden van fabrikanten¹³;
- subsidies op zuinige voertuigen;
- verschillende vormen van prijsbeleid:
 - verhoging van de brandstofaccijns;
 - CO₂-differentiatie van aanschafbelasting of houderschapsbelasting;
 - CO₂-differentiatie van kilometerheffing;
- opname van bestelauto's in een gesloten of open emissiehandelssysteem.

Net als voor personenauto's kan CO₂-reductie bij personenauto's worden afgedwongen door invoering van een CO₂-limiet op het niveau van voertuigen of verkoopgemiddelden per fabrikant. Voor nieuwe bestelauto's is meting van brandstofverbruik en CO₂-emissies sinds een paar jaar onderdeel van de typekeuringstest voor nieuwe voertuigen. Dit levert binnen enkele jaren ook voor deze categorie voertuigen een basis waarop CO₂-normering kan worden geïmplementeerd.

10.6 Voorbeelden van beleid m.b.t. bestelauto's in andere landen

In Europa bestaat er nog geen beleid m.b.t. de CO₂-emissies van bestelauto's. Wel zijn er studies uitgevoerd naar potentieel en kosten van CO₂-reductie bij bestelauto's (RAND, 2003; TNO, 2004b; TNO, 2006a). In de recente communicatie (COM(2007) 19) geeft de Europese Commissie aan specifiek beleid te willen gaan voeren dat erop gericht is de CO₂-emissie van nieuw verkochte bestelauto's te reduceren tot 175 g/km in 2012 en 160 g/km in 2015. Er is echter nog niet bekend op welke manier de Europese Commissie dit beleid vorm wil geven. Een of andere vorm van CO₂-normering ligt echter wel voor de hand.

¹³ Dit wordt momenteel overwogen door de Europese Commissie.



11 Technische maatregelen voor vrachtwagens

11.1 Inleiding

Omdat brandstof een belangrijke kostenpost vormt, is er in het goederenvervoer van oudsher veel aandacht voor brandstofbesparing. Vergeleken met personenauto's, is het resterende potentieel voor verbetering van het voertuigrendement derhalve veel kleiner. Bovendien opereert een vrachtwagenmotor, zeker bij lange-afstandsvervoer, een veel kleiner deel van zijn tijd in deellast, waar het motorrendement slecht is. In tegenstelling tot personenauto's hebben bij vrachtwagens maatregelen die deellast vermijden of het rendement bij deellast verbeteren dus een beperkter reductiepotentieel. Hybride aandrijving kan bij bussen en bij distributievoertuigen in stadsverkeer significante voordelen bieden maar levert op de snelweg geen CO₂-reductie. Meer wordt verwacht van verdere optimalisatie van lucht- en rolweerstand en voertuiggewicht. Een mogelijke route daarbij is het gebruik van langere voertuigcombinaties met groter laadvermogen per eenheid gewicht of motorvermogen. Binnenkort start waarschijnlijk een door de EU gefinancierde studie om de verschillende technische en beleidsopties voor CO₂-reductie bij HD-voertuigen te verkennen. Verwacht mag worden dat er een aantal relatief goedkope mogelijkheden wordt geïdentificeerd met een beperkt reductiepotentieel, die nu door allerlei belemmeringen nog niet worden benut, maar dat grote stappen in CO₂-reductie alleen mogelijk zijn door toepassing van CO₂-arme of CO₂-neutrale (bio)brandstoffen.

Hieronder wordt voor vrachtwagens een aantal technische maatregelen in detail beschreven. Per maatregel wordt ingegaan op het reductiepotentieel op voertuigniveau, de kosten van de maatregel op voertuigniveau en op de kosteneffectiviteit uitgedrukt in CO₂-vermijdingskosten. Inschattingen van het totale potentieel van de maatregelen bij toepassing in de Nederlandse voertuigvloot worden gepresenteerd in 11.9.

Kwantitatieve data in onderstaande zijn in eerste instantie gebaseerd op een bijdrage van TU Graz (TU Graz, 2006) aan een nog niet gepubliceerd rapport voor DG Enterprise van de Europese Commissie. In een laat stadium van het project kwam (ECN, 2007) beschikbaar, waarin op basis van een aantal Amerikaanse studies en één Europese studie¹⁴ een overzicht wordt geschetst van reductiepotentiëlen voor de in dit hoofdstuk beschreven opties. Een overzichtstabel uit deze studie is opgenomen in Bijlage F.

¹⁴ Ang-Olson, 2002; Bates, 2001; Langer, 2004; Saricks, 2003.

11.2 Verbetering van motorrendement bij vrachtwagens

11.2.1 Wat houdt de optie in?

Dieselmotoren in vrachtwagens hebben reeds een zeer goed rendement. Het potentieel voor verdere verbeteringen is beperkt. Opties voor de middellange termijn zijn waterinjectie, alternatieve verbrandingsconcepten zoals HCCI¹⁵ en verbetering van het rendement van SCR-deNOx. Daarnaast zijn verschillende incrementele verbeteringen van de bestaande technologie mogelijk. Daaronder valt ook de toepassing van smeermiddelen met lage viscositeit (LVL).

11.2.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

(TU Graz, 2006) verwacht dat brandstofverbruik en CO₂-emissies op voertuigniveau met een procent of 4 verlaagd kunnen worden door incrementele verbeteringen aan de motor. Waterinjectie kan een vergelijkbaar effect hebben. Voor de andere opties worden geen getallen gegeven. ECN (2007) geeft getallen van rond de 10% voor puur motortechnische maatregelen, met meerkosten van zo'n € 1.150, maar geeft ook aan dat een deel van het voor Amerikaanse voertuigen geïdentificeerde potentieel waarschijnlijk in Europa al gerealiseerd is.

Naast motortechnische maatregelen wordt in (ECN 2007) ook nog eens 4 tot 8% reductie genoemd voor maatregelen die het stationair draaien van de motor verminderen.

11.2.3 Voor- en nadelen

Nieuwe verbrandingsconcepten als HCCI zijn technisch nog niet rijp. Het is dus moeilijk te voorspellen wat eventuele voor- en nadelen zijn. Van andere technieken worden geen specifieke voor- of nadelen verwacht.

11.2.4 Vermijdingskosten

Op basis van een totale CO₂-reductie van 5% (per voertuigkilometer) en een toename van de voertuigkosten met 3%, komt (TU Graz, 2006) voor een olieprijs van 36 €/bbl (kosten diesel 0,30 €/l excl. belasting) op vermijdingskosten van -33 €/ton. Door het grote aantal kilometers dat een vrachtwagen gedurende zijn leven aflegt renderen energiebesparende maatregelen bij vrachtwagens eerder dan bij personenauto's.

¹⁵ HCCI = homogeneous charge compression ignition, spontane zelfontbranding van een arm, homogeen brandstof-luchtmengsel. Combineert eigenschappen van otto- en dieselmotor en levert hoog rendement en lage NO_x-emissies. Uitdaging voor R&D ligt in beheersen van het verbrandingsproces bij wisselende lasten.



11.2.5 Instrumenteerbaarheid

Hoewel de vermijdingskosten voor verbetering van motorrendement negatief zijn, is het niet vanzelfsprekend dat deze maatregel ook ten volle autonoom wordt ingevoerd. Stimulering kan op verschillende manieren plaatsvinden:

- invoering van een verbruiks- of CO₂-emissienorm voor HD-motoren;
- invoering van een verbruiks- of CO₂-emissie norm op voertuigniveau;
- opname van goederenvervoer over de weg in ETS of in een ander CO₂-emissiehandelssysteem.

Voor toepassing van een verbruiks- of CO₂-emissie norm op voertuigniveau is in principe een testprocedure op voertuigniveau nodig. De typekeuringstest vindt in Europa echter plaats op het niveau van de motor. Reden hiervoor is dat vrachtwagens in zeer veel varianten op de markt komen en de uiteindelijke emissies voor een groot deel bepaald worden door de carrosserie die er buiten verantwoordelijkheid van de voertuigfabrikant op gebouwd wordt.

In de Japanse 'Top Runner' wetgeving is wel sprake van een normering op voertuigniveau. CO₂-emissies op voertuigniveau worden deels bepaald op basis van testresultaten en deels met behulp van een voorgeschreven rekenmethodiek. Het is nog niet duidelijk in hoeverre een dergelijke aanpak in Europa toepasbaar is. De Japanse 'Top Runner' wetgeving wordt nader beschreven in paragraaf 11.11.3 en Bijlage G.

11.2.6 Synergie met andere gebieden

Nieuwe verbrandingsconcepten zoals HCCI zullen zeker invloed hebben op de luchtverontreinigende emissies. Het is gezien het prille stadium van ontwikkeling nog niet eenvoudig mogelijk om deze invloed te kwantificeren. De vraag is overigens of de techniek zodanig wordt ingezet dat luchtverontreinigende emissies lager zullen zijn dan de vigerende Euro-norm (Euro 6 of later). Veeleer zullen eventuele emissievoordelen worden gebruikt om te besparen op de kosten van andere emissiereducerende maatregelen.

11.3 Vermindering rolweerstand bij vrachtwagens

11.3.1 Wat houdt de optie in?

Net als bij personenauto's kunnen energiegebruik en CO₂-emissies van vrachtwagens worden verminderd door toepassing van lage-weerstandsbanden (LRRT).

11.3.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Het reductiepotentieel van LRRT is bij vrachtwagens hoger dan bij personenauto's. TU Graz (2006) schat de mogelijke reductie op 6% (per voertuigkilometer). In (ECN, 2007) wordt een reductie van 3 - 4% genoemd.

11.3.3 Voor- en nadelen

De hierboven genoemde optie heeft in principe geen nadelen mits het fabrikanten lukt om lage-rolweerstandsbanden te ontwikkelen zonder in te leveren op de ander eisen die aan banden worden gesteld. Belangrijk voordeel van LRRT is dat ze ook op bestaande voertuigen kunnen worden toegepast, waardoor sneller een relatief grote reductie kan worden gerealiseerd.

11.3.4 Vermijdingskosten

Op basis van een totale CO₂-reductie van 6% en additionele kosten van € 50 per band, komt (TU Graz, 2006) voor een olieprijs van 36 €/bbl (kosten diesel 0,30 €/l excl. belasting) op vermijdingskosten van -3 €/ton. ECN (2007) noemt totale kosten van € 400 per voertuig voor zware voertuigen wat in de zelfde grootteorde is.

11.3.5 Instrumenteerbaarheid

Stimulering van LRRT vereist allereerst testprocedures waarmee energiezuinige banden zich kunnen onderscheiden, eventueel vergezeld van een labellingsysteem. Op basis hiervan kunnen fleetowners brandstofverbruik mede in overweging nemen bij de aanschaf van nieuwe banden.

Stimulering via subsidies lijkt lastig en niet zinvol. Op Europees niveau zou normering kunnen worden opgesteld, op basis van genoemde testprocedures, waarmee de rolweerstand van banden aan minimumeisen wordt onderworpen. Invoering van een verbruiks- of CO₂-emissie norm op voertuigniveau of opname van goederenvervoer over de weg in ETS of in een ander CO₂-emissiehandelsstelsel zijn generieke beleidsinstrumenten die alle CO₂-reducerende maatregelen gelijkmatig stimuleren.

11.3.6 Synergie met andere gebieden

Op het gebied van banden wordt ook gewerkt aan stillere banden. Het is niet bekend of technische maatregelen die de rolweerstand verminderen positief of negatief uitwerken op de geluidsemissie van banden.

11.4 Vermindering luchtweerstand bij vrachtwagens

11.4.1 Wat houdt de optie in?

Door middel van verbeterd design en verdergaande toepassing van bijvoorbeeld 'wind deflectors' kan de luchtweerstand van trucks worden verlaagd.

11.4.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

TU Graz (2006) schat het totale reductiepotentieel op 6% (per voertuigkilometer). ECN (2007) geeft verschillende maatregelen die 1 tot 4% reductie opleveren waarbij niet duidelijk is of dit data uit verschillende bronnen betreft of



maatregelen die opgeteld kunnen worden. Voor de langere termijn wordt pneumatische beïnvloeding van de luchtstroming als optie genoemd met 5% reductiepotentieel.

11.4.3 Voor- en nadelen

Wind deflectors voegen gewicht toe aan het voertuig hetgeen ten koste gaat van nuttig laadvermogen. Dit speelt echter alleen een rol voor vervoer van goederen waarbij toegestaan laadgewicht de beperkende factor is (i.t.t. laadvolume).

11.4.4 Vermijdingskosten

Additionele kosten voor verbetering van aërodynamica worden door TU Graz (2006) geschat op 7 – 8% van de voertuigprijs. Op basis van een olieprijs van 36 €/bbl (kosten diesel 0,30 €/l excl. belasting) wordt berekend dat de vermijdingskosten 56 €/ton bedragen.

11.4.5 Instrumenteerbaarheid

Invoering van een verbruiks- of CO₂-emissie norm op voertuigniveau waarin de effecten van verbeterde luchtweerstand correct worden meegenomen vereist een voor vrachtwagens complexe en zeer kostbare testprocedure. Opname van goederenvervoer over de weg in ETS of in een ander CO₂-emissiehandelssysteem is een generieke beleidsinstrument waarmee reductie van praktijkemissies wordt gestimuleerd op een manier die niet afhankelijk is van gestandaardiseerde testmethoden.

11.4.6 Synergie met andere gebieden

Verhoging van de toegestane lengte van voertuigen (al dan niet in combinatie met verhoging van het toegestane gewicht) maakt het mogelijk om de CO₂-emissie per tonkilometer te verlagen maar biedt ook mogelijkheden voor toepassing van maatregelen die de stroomlijn verder verbeteren.

11.5 Verhoging van toegestaan voertuiggewicht en/of toegestane lengte bij vrachtwagens

11.5.1 Wat houdt de optie in?

In de meeste Europese landen is het maximum voertuiggewicht (gross vehicle weight of GVW) van vrachtwagencombinaties 40 ton. Dit zou kunnen worden verhoogd tot 44 ton zonder dat aanpassingen aan de voertuigen nodig zijn. In Scandinavische landen is een GVW van 60 ton toegestaan. Verhoging van het toegestane GVW leidt tot lagere CO₂-emissie per tonkm.

In Nederland is van 2004 tot 2006 een proef gedaan met Lange en Zware Voertuigen, zgn. LZV. Het betreft voertuigcombinaties van een vrachtauto met een aanhangwagen of meerdere aanhangwagens. Deze combinaties mogen langer

zijn dan de wettelijke 18,75 meter. Een LZV mag 25,25 meter lang zijn. Ook ligt met 60 ton het maximum toegestane voertuiggewicht van de LZV combinatie hoger dan de standaardwaarde van 50 ton.

11.5.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Een verhoging van het GVW van 40 naar 44 ton levert vanzelfsprekend een verhoging van de CO₂-emissies per voertuigkilometer op. Op systeemniveau levert het echter een brandstofbesparing en CO₂-reductie van 9% per tonkm op. Verhoging van 40 naar 60 ton levert een reductie van 20% per tonkm op. Dit effect geldt echter alleen voor zware vrachtwagens in het lange-afstandstransport. Voor kleine vrachtwagens en bij ritten waarbij het maximum laadvermogen niet wordt benut heeft deze maatregel geen effect.

Uit de evaluatie van de Nederlandse proef met langere en zwaardere vrachtwagencombinaties blijkt dat LZV's gemiddeld voor dezelfde lading 33% minder brandstof gebruiken. Volgens Arcadis (2006) kunnen 7 tot 31% van de reguliere rondritten met vrachtwagens met een laadvermogen groter dan 20 ton worden vervangen door LZV-voer. De potentiële omvang van het aantal LZV's is hierbij 6.000-12.000. Deze LZV's vervangen dan 8.000-16.000 reguliere combinaties.

11.5.3 Voor- en nadelen

Hogere aslasten, in het geval van verhoging tot 44 ton zonder aanpassingen aan de voertuigen, leiden mogelijk tot verhoogde slijtage van het wegdek. De kosten daarvan zijn in onderstaande vermijdingskosten niet meegenomen.

11.5.4 Vermijdingskosten

Als bij verhoging van het GVW van 40 naar 44 ton ook een 10% hogere aslast wordt toegestaan, dan zijn geen aanpassingen aan het voertuig nodig. Additionele kosten van slijtage van banden en remmen wordt verwaarloosbaar geacht. Op basis van een olieprijs van 36 €/bbl (kosten diesel 0,30 €/l excl. belasting) schat TU Graz (2006) de vermijdingskosten voor deze maatregel op -97 €/ton.

Voertuigen met 60 ton GVW zijn mogelijk 35% duurder dan voertuigen met 40 ton GVW, door aanpassingen aan motor en voertuig. Daar staat tegenover dat het nuttig laadvermogen meer dan 50% hoger is. Kosten van chauffeur en brandstof zullen per tonkm significant lager zijn. Op basis van een olieprijs van 36 €/bbl (kosten diesel 0,30 €/l excl. belasting) schat TU Graz (2006) de vermijdingskosten voor deze maatregel op -58 €/ton.

Op basis van de resultaten van Arcadis (2006) is duidelijk dat de CO₂-vermijdingskosten van LZV's negatief zijn.



11.5.5 Instrumenteerbaarheid

De besparingen zijn bij deze maatregel zo groot dat verwacht worden dat deze maatregel autonoom wordt ingevoerd wanneer Europese of nationale wetgeving een hoger GVW toelaat. Opname van goederenvervoer over de weg in ETS of in een ander CO₂-emissiehandelssysteem is een generiek beleidsinstrument waarmee deze reductie van praktijkemissies verder kan worden gestimuleerd.

11.5.6 Synergie met andere gebieden

Verhoging van het toegestane GVW heeft mogelijk een beperkt gunstig effect op de luchtverontreinigende emissies per tonkm en kan bijdragen aan vermindering van congestie door afname van aantal vrachtwagens op de weg.

Uit (Arcadis, 2006) blijkt dat LZV's zowel bedrijfseconomische als maatschappelijke voordelen opleveren en dat de emissies van uitlaatgassen met 3-5% afnemen. Daarnaast neemt bij grootschalige inzet de filedruk af met 1% en kan de kostprijs per tonkilometer met maximaal 25% dalen. Ook blijkt uit de proef dat het aantal verkeersdoden en gewonden zal afnemen.

11.6 Lichtgewicht constructie bij vrachtwagens

11.6.1 Wat houdt de optie in?

Lichtgewicht constructie leidt bij niet volledige belading tot reductie van het verbruik per voertuigkilometer (en dus ook per tonkm). Door lichtgewicht constructie neemt echter het nuttig laadgewicht toe. Bij volledige belading is het verbruik op voertuigniveau dus niet lager maar vindt wel een reductie plaats van energiegebruik en CO₂-emissies per tonkm.

11.6.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Op basis van simulaties voor voertuigen met verschillende beladingsgraden schat TU Graz (2006) dat de situatie van een 18% gewichtsreductie door lichtgewicht construeren een gemiddelde CO₂-reductie van 7% per tonkm oplevert. In (ECN, 2007) wordt het CO₂-reductiepotentieel van gewichtsreductie voor zware vrachtwagens geschat op 0,4% (op basis van Europese studie) tot 10% (op basis van Amerikaanse studies) en op zo'n 5% voor middelzware en lichte vrachtwagens.

11.6.3 Voor- en nadelen

Lichtere voertuigen leiden mogelijk tot minder slijtage aan het wegdek. De kostenvoordelen daarvan zijn in onderstaande vermijdingskosten niet meegenomen.

11.6.4 Vermijdingskosten

Lichtgewicht construeren is volgens een dure technologie. 18% gewichtsbeparing leidt volgens deze studie tot 50% meerkosten. Om deze reden komt TU Graz (2006) bij een olieprijs van 36 €/bbl (kosten diesel 0,30 €/l excl. belasting) op vermijdingskosten van 860 €/ton. Kosten voor gewichtsreductie worden door ECN (2007) echter geschat op zo'n € 1.500 bij een reductiepotentieel van zo'n 5%, hetgeen resulteert in CO₂-vermijdingskosten van ordegrrootte 100 €/ton. De beperkte hoeveelheid beschikbare data m.b.t. de kosten van lichtgewicht construeren maakt het moeilijk om aan te geven welke waarde betrouwbaarder is.

11.6.5 Instrumenteerbaarheid

Stimulering van R&D t.b.v. kostenreductie van de voor gewichtreductie toegepaste geavanceerde materialen en constructietechnieken lijkt vooralsnog de belangrijkste beleidsmaatregel waarmee de toepassing van deze optie kan worden gestimuleerd.

11.6.6 Synergie met andere gebieden

Toepassing van lichtgewicht voertuigen heeft mogelijk beperkt positief effect op de luchtverontreinigende emissies per tonkm.

11.7 Optimalisatie van vrachtwagens voor lange-afstandtransport

11.7.1 Wat houdt de optie in?

HD voertuigen worden ontworpen om zware mechanische belastingen te kunnen doorstaan, bijvoorbeeld bij oneffen en onverharde wegen op bouwplaatsen. Bij gebruik op de snelweg t.b.v. lange-afstandtransport is de mechanische belasting van veel componenten kleiner dan in de worst case waarvoor het voertuig ontworpen is. Wanneer voertuigen speciaal voor deze toepassing worden ontworpen kan op gewicht bespaard worden op een wijze die goedkoper is dan het in paragraaf 11.6 beschreven lichtgewicht construeren.

11.7.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

TU Graz (2006) schat de te realiseren brandstofbesparing op 4% voor voertuigen waarop deze maatregel van toepassing is.

11.7.3 Voor- en nadelen

Lichtere voertuigen leiden mogelijk tot minder slijtage aan het wegdek. De kostenvoordelen daarvan zijn in onderstaande vermijdingskosten niet meegenomen.



11.7.4 Vermijdingskosten

Aannemende dat deze maatregel leidt tot 10% meerkosten, komt TU Graz (2006) bij een olieprijs van 36 €/bbl (kosten diesel 0,30 €/l excl. belasting) op vermijdingskosten van 225 €/ton.

11.7.5 Instrumenteerbaarheid

Specifiek beleid voor deze optie lijkt niet zinvol. Generieke beleidsinstrumenten, zoals verschillende vormen van emissiehandel, zullen deze optie stimuleren zodra de kosten van emissierechten hoger worden dan de vermijdingskosten van deze optie.

11.7.6 Synergie met andere gebieden

Lichtere voertuigen hebben mogelijk een beperkt positief effect op luchtverontreinigende emissies per tonkm.

11.8 Verbeterde hulpsystemen en accessoires

11.8.1 Wat houdt de optie in?

In HD-voertuigen wordt vaak niet alleen energie gebruikt voor aandrijving maar ook voor andere doelen zoals cabineverwarming (ook tijdens stilstand), pompen, en koeling van cabine en lading. Op deze gebieden valt energie te besparen door bijv. gebruik van een zuinige APU (auxiliary power unit) in plaats van de verbrandingsmotor. Op termijn zou dit zelfs een brandstofcel kunnen zijn. Ook is het mogelijk om elektrisch te koelen met door zonnecellen op het dak van de vrachtwagen opgewekte elektriciteit. Verwarming van de cabine tijdens stilstand kan met een standkachel. Ook kan het rendement verbeterd worden door hulpsystemen als airco en ventilatie elektrisch aan te drijven.

11.8.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

ECN (2007) schat de te realiseren brandstofbesparing op 1,5 tot 6% voor voertuigen waarop deze maatregel van toepassing is. Overigens is ook hier de vraag in hoeverre deze opties in Europa niet al toegepast worden.

11.8.3 Voor- en nadelen

Genoemde systemen zijn complexer en duurder, maar er lijken geen duidelijke nadelen aan te kleven. Voordelen zouden kunnen liggen in verbeterd comfort voor de chauffeur en betere beheersing van het klimaat in de laadruimte.

11.8.4 Vermijdingskosten

ECN (2007) berekent geen vermijdingskosten. De kosten van beschreven systemen (zie Bijlage F) worden geschat op € 400 - € 1.150.

11.8.5 Instrumenteerbaarheid

Specifiek beleid kan worden ingezet om efficiënte hulpsystemen verplicht te stellen of om de efficiency van de systemen te reguleren (normstelling). Generieke beleidsinstrumenten, zoals verschillende vormen van emissiehandel, zullen deze optie stimuleren zodra de kosten van emissierechten hoger worden dan de vermijdingskosten van deze optie.

11.8.6 Synergie met andere gebieden

Gebruik van efficiënte en schone APU's kan mogelijk ook bijdragen aan vermindering van luchtverontreinigende emissies, bijv. op parkeerplaatsen voor vrachtwagens.

11.9 Inschatting van absolute reductiepotentiëlen voor vrachtwagens op basis van het GE-scenario

In Tabel 17 wordt het resultaat weergegeven van een indicatieve berekening van de absolute reductiepotentiëlen in 2030 van toepassing in Nederland van een aantal van de in dit hoofdstuk beschreven opties om de CO₂-emissies van vrachtwagens te reduceren. De tabel bevat ook resultaten voor verhoogde bijmenging van 2^e generatie biobrandstof (20% op basis van energie-inhoud) en voor toepassing van logistieke optimalisatie (op basis van data uit (TU Graz, 2006)). Hybride aandrijving is niet meegenomen omdat dit maar voor een beperkt deel van de Nederlandse vrachtwagens en een nog beperkter deel van de gereiden kilometers voordelen biedt.

Biobrandstoffen worden nader besproken in hoofdstuk 13. Om de effecten van toepassing van biobrandstoffen te kunnen verrekenen is het reductiepotentieel berekend op basis van geschatte WTW CO₂-emissies. Voor conventionele diesel zijn deze een factor 1,195 hoger dan de directe TTW CO₂-emissies (op basis van gegevens uit (Concawe, 2006)).

Tabel 17 Indicatieve schatting van reductiepotentiëlen van maatregelen bij vrachtwagens, t.o.v. baseline op basis van GE-scenario (toelichting zie tekst)

Vrachtwagens

reductie-optie	TTW reductie [%]	WTT reductie [%]	2030 baseline TTW emissie [g/km]	aandeel in vloot [%]	reductie-potentieel WTW [kton]	over-blijvende emissie WTW 2030 [kton]	reductie t.o.v. GE baseline 2030 [%]	reductie t.o.v. 2005 [%]
GE-baseline			920,0			12826		8296
44 ton trucks	9,0%	0,0%	920,0	10%	115	12710	1%	-53%
60 ton trucks	20,0%	0,0%	911,7	10%	254	12456	3%	-50%
zuiniger motor	5,0%	0,0%	893,5	100%	623	11833	8%	-43%
LRRT	6,0%	0,0%	848,8	100%	710	11123	13%	-34%
reductie luchtweerstand	6,0%	0,0%	797,9	50%	334	10790	16%	-30%
lange-afstandsvoertuigen	4,0%	0,0%	773,9	10%	43	10746	16%	-30%
lichtgewicht constructie	7,0%	0,0%	770,9	75%	564	10182	21%	-23%
zuinig rijden	5,0%	0,0%	730,4	100%	509	9673	25%	-17%
bijmengen 20% 2e gen. biobrandstof	0,0%	17,3%	693,9	100%	1670	8003	38%	4%
logistieke optimalisatie	10,0%	0,0%	574,8	50%	400	7603	41%	8%



Uitgangspunt voor de berekening is de ontwikkeling van volume en CO₂-emissies zoals beschreven in het WLO GE-scenario (MNP, 2006a), zie ook Bijlage B. Reductiepotentiëlen voor verschillende opties worden gestapeld toegepast op de gemiddelde CO₂-emissiefactor voor vrachtauto's in 2030 volgens het GE-scenario (920 g/km).

Duidelijk is dat het potentieel van technische maatregelen bij vrachtwagens beperkter is dan bij personenauto's en bestelauto's. Toepassing van het volledige potentieel van technische maatregelen om vrachtwagens zuiniger te maken resulteert nog steeds in een toename van de CO₂-emissies door vrachtwagens t.o.v. 2005. De in Tabel 17 opgenomen optie van logistieke optimalisatie is feitelijk een volumemaatregel. De eventuele noodzaak van volumemaatregelen voor het halen van lange-termijn CO₂-reductiedoelen wordt besproken in hoofdstuk 17.

11.10 Specifieke beleidsmaatregelen voor zuinige vrachtwagens

In het algemeen kan de toepassing van energiebesparende technologie bij vrachtwagens worden gestimuleerd of afgedwongen m.b.v. de volgende beleidsmaatregelen:

- CO₂-emissionormen, opgelegd op het niveau van voertuigen of bijv. van verkoopgemiddelden van fabrikanten;
- subsidies op zuinige voertuigen;
- verschillende vormen van prijsbeleid:
 - verhoging van de brandstofaccijns;
 - CO₂-differentiatie van aanschafbelasting of houderschapsbelasting;
 - CO₂-differentiatie van kilometerheffing;
- opname van vrachtwagens in een gesloten of open emissiehandels-systeem.

Normering van CO₂-emissies van zware voertuigen (vrachtwagens en bussen) is op dit moment niet eenvoudig mogelijk. De typekeuringstest is bij deze categorie voertuigen gedefinieerd op het niveau van de motor. Emissies worden uitgedrukt in g/kWh gebaseerd op de aan de krukas afgeleverde energie. In de huidige test wordt ook het brandstofverbruik in g/kWh gemeten. In principe is het dus mogelijk een efficiencytest op motorniveau in te voeren. Daarmee zijn echter de effecten van andere dan motortechnische maatregelen die het verbruik op voertuigniveau verminderen niet meetbaar. Ook is de huidige typekeuringstestprocedure niet toepasbaar op hybride aandrijving. In Japan is overigens wel een verbruiksnorm voor vrachtwagens in gebruik. Deze is in feite ook motorgebaseerd, maar normeert het gesimuleerde brandstofverbruik van gespecificeerde voertuigtypes die gebruik maken van de motor in kwestie. Een dergelijke procedure zou voor Europa ook kunnen worden ontwikkeld, maar het is de vraag of daar draagvlak voor kan worden gevonden bij politiek en m.n. industrie.

CO₂-differentiatie van belastingen of heffingen voor vrachtwagens vereist oplossing van bovenstaand probleem in de zin dat er bij voorkeur een indicator voor CO₂-emissies op voertuigniveau beschikbaar moet zijn. Evt. zou de differentiatie

op het rendement van de motor gebaseerd kunnen zijn, maar de vraag is of dat effectief leidt tot CO₂-emissiereductie.

11.11 Voorbeelden van beleid m.b.t. vrachtwagens in andere landen

11.11.1 EU

Op het gebied van goederenvervoer bestaat er nog geen specifiek CO₂-beleid in Europa. Goederenvervoer over de weg profiteert wel mee van de Biobrandstoffen Richtlijn. Veel Europees beleid is juist gericht op de verbetering van de infrastructuur voor en de doorstroming van het goederenvervoer. De EU is wel voornemens beleid te gaan voeren m.b.t. de CO₂-emissies van HD voertuigen en heeft een onderzoek uitgezet naar mogelijkheden, potentiëlen en kosten.

11.11.2 USA

Op het gebied van vrachtwagens bestaat er in de VS het 21st Century Truck Programme. Hierin delen overheid en industrie de kosten van R&D voor verschillende technologieën waarmee het energetisch rendement van vrachtwagens kan worden verbeterd. Het programma moet binnen een looptijd van 10 jaar leiden tot productierijpe prototypes.

11.11.3 Japan

Het Japanse beleid voor stimulering van zuinige voertuigen (en ook andere producten) is gebaseerd op de zgn. 'top runner approach'. Voor verschillende voertuigklassen zijn verbruiksnormen geformuleerd die gebaseerd zijn op het brandstofverbruik van het meest efficiënte voertuig in die klasse op het moment waarop de norm bepaald werd. Ook voor trucks en bussen zijn er in Japan op deze wijze normen gesteld, met als doel om tussen 2002 en 2015 het gemiddelde brandstofverbruik met 12% te verlagen.

Een gedetailleerde beschrijving van de Japanse normstelling voor HD Voertuigen en de bijbehorende simulatiemethode is te vinden in (HVFESEG, 2005). Een samenvatting is te vinden in Bijlage G. Voor een gegeven voertuigmodel wordt het brandstofverbruik door middel van simulatie berekend op basis van:

- specifieke gegevens over het motorrendement (een gemeten statisch motorrendement), de toegepaste versnellingsbak in termen van aantal versnellingen en overbrengingsverhoudingen en de bandenmaat (tyre dynamic load radius);
- gestandaardiseerde voertuigparameters voor de klasse waarin het voertuig zich bevindt, m.b.t. voertuiggewicht, rolweerstand, luchtweerstand en frontaal oppervlak;
- twee gestandaardiseerde testcycli (snelheid-tijd patronen): de JE05 cyclus voor stadsverkeer en een cyclus voor inter-urban verkeer (80 km/h constant met door de tijd wisselende gradiënt (hellingshoek)).



Op basis van voor een werkelijk voertuig specifieke gegevens over motor en versnellingsbak wordt dus d.m.v. simulatie het brandstofverbruik bepaald voor de veronderstelde toepassing van die motor en versnellingsbak in een gestandaardiseerd (voor die klasse typisch) voertuig. Maatregelen aan het voertuig die de rol- en luchtweerstand verlagen worden in deze methodiek dus niet meegenomen. Ook effecten van toepassing van automatische versnellingsbakken en geautomatiseerde handbakken (automated manual transmission – AMT) kunnen in de simulatie niet meegenomen worden. In (HVFESEG, 2005) wordt dat erkend en wordt opgemerkt dat er men nog werkt aan een methodiek om ook die aspecten te kunnen evalueren. Een belangrijk nadeel van de methodiek is ook dat hij niet van toepassing is op hybride aandrijving die m.n. voor stadsbussen en lichte trucks een belangrijke optie zou kunnen worden.

De vraag is of een dergelijke aanpak in Europa ook toepasbaar zou kunnen zijn. In Europa worden vrachtwagenmotoren ook op basis van motorproefstandsmetingen getypekeurd. Fabrikanten bepalen voor eigen doeleinden sowieso gedetailleerde motorkenvelden. Het uitvoeren van simulaties voor alle voertuigmodellen waarin een motor wordt toegepast brengt een te overziene hoeveelheid werk en kosten met zich mee. In principe kan de Japanse aanpak dus een interessante en praktisch bruikbare methode zijn voor normering van het motorrendement. De normstelling an sich dient mogelijk wel anders te worden bepaald dan in de Japanse Top Runner aanpak. Het rendement van de beste in een klasse levert een niet heel erg ambitieuze doelstelling op, vooral niet wanneer de periode waarin deze gerealiseerd moet worden zo lang is als in Japan (2002 - 2015). De waarden die in Japan worden gehanteerd zijn door de gebruikte cyclus niet één op één te vergelijken met Nederlandse cijfers, maar komen qua ordegrrootte vrij goed overeen met de praktijk-verbruikscijfers voor moderne (Euro 4) trucks in Nederland.



12 Technische maatregelen voor bussen

12.1 Inleiding

Bussen vallen onder de categorie Heavy-Duty (HD) voertuigen. De CO₂-emissie van stads- en streekbussen en touringcars kan dus voor een deel worden verlaagd door middel van maatregelen die ook op vrachtwagens kunnen worden toegepast. Dit geldt met name voor maatregelen m.b.t. motorrendement en aandrijflijn. Daarnaast bieden de specifieke toepassing en de specifieke carrosserie van bussen andere mogelijkheden voor CO₂-reductie. Omdat stadsbussen iedere avond in de remise terugkomen en een relatief beperkte actieradius per dag hebben is bijvoorbeeld toepassing van gasvormige brandstoffen eenvoudiger mogelijk.

Hieronder wordt voor bussen een aantal technische maatregelen in detail beschreven. Per maatregel wordt ingegaan op het reductiepotentieel op voertuigniveau, de kosten van de maatregel op voertuigniveau en op de kosten-effectiviteit uitgedrukt in CO₂-vermijdingskosten. Inschattingen van het totale potentieel van de maatregelen bij toepassing in de Nederlandse voertuigvloot worden gepresenteerd in 12.5.

12.2 Opties die ook bij vrachtwagens kunnen worden toegepast

12.2.1 Verbetering van motorrendement

Bij bussen kunnen in principe dezelfde maatregelen worden toegepast als bij vrachtwagens om het motorrendement te verbeteren. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 11.2. Het relatieve reductiepotentieel is bij toepassing in bussen niet noodzakelijk gelijk aan dat bij vrachtwagens, zoals het ook bij verschillende vrachtwagentoepassingen niet gelijk is. M.n. stadsbussen hebben een zeer specifiek ritpatroon dat gekarakteriseerd wordt door lage snelheden, relatief sterke acceleraties vanuit stilstand en veel stationair draaien. Maatregelen die sterk op het deellastrendement van de motor aangrijpen zouden bij bussen beter kunnen renderen.

12.2.2 Toepassing van lage rolweerstandsbanden

Voor een beschrijving van deze optie wordt verwezen naar paragraaf 11.3. Omdat de gemiddelde snelheid van m.n. stads- en streekbussen lager is zullen de voordelen van deze optie lager uitvallen. Deze optie is dus met name interessant voor touringcars die grotere afstanden op de snelweg afleggen.

12.2.3 Verminderen van luchtweerstand

Voor een beschrijving van deze optie wordt verwezen naar paragraaf 11.4. Omdat de gemiddelde snelheid van bussen lager is zullen de voordelen van deze optie lager uitvallen. Deze optie is dus met name interessant voor touringcars die grotere afstanden op de snelweg afleggen.

12.2.4 Verminderen van voertuiggewicht

De laatste decennia worden er reeds grote vorderingen gemaakt in de toepassing van lichtgewichtmaterialen en lichte constructietechnieken in bussen. De geringe grootte van productieseries, het hoge aandeel handwerk en de relatief simpele vorm van een buscarrosserie maken toepassing van deze materialen mogelijk. Er zijn op dit moment geen bronnen beschikbaar waarmee deze optie meer kwantitatief kan worden beschreven.

12.2.5 Toepassing van biobrandstoffen

Biobrandstoffen worden beschreven in hoofdstuk 13.

12.3 Hybride aandrijving voor bussen

12.3.1 Wat houdt de optie in?

Bij stadsbussen wordt meestal een serie-hybride aandrijving toegepast. Daarbij drijft de verbrandingsmotor een generator aan (generatorset). De geproduceerde elektriciteit wordt ofwel gebruikt om middels één of meer elektromotoren de wielen aan te drijven of opgeslagen in een batterij voor later gebruik. Tijdens afremmen wordt de elektrische aandrijving gebruikt als generator en wordt teruggewonnen energie teruggevoerd naar de batterij. Indien de batterij voldoende capaciteit en vermogen heeft kan bij lage snelheden puur elektrisch worden gereden. De verbrandingsmotor zal in de regel zo worden uitgelegd dat hij het gemiddeld gevraagde vermogen dekt. Piekvermogens worden opgevangen door tegelijkertijd energie van de generatorset en de batterij te betrekken.

12.3.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Ten opzichte van een conventionele dieselbussen is met hybride aandrijving een reductie van brandstofverbruik en CO₂-emissies van zo'n 15% haalbaar (volgens recente data (TU Graz, 2006)).

12.3.3 Voor- en nadelen

Hybride aandrijving heeft bij toepassing in bussen geen significante nadelen. Wel is bekend dat passagiers die bij een halte wachten moeten wennen aan het feit dat de motor op hogere last draait terwijl de bus stil staat en dus meer geluid produceert dan een normale bus waarbij de motor stationair draait. Serie-hybride aandrijving heeft als belangrijk voordeel dat de motor op grotere afstand van de



wielen kan worden geplaatst. Er is dus meer ontwerpvrijheid voor inrichting van de bus. Bij toepassing van naafmotoren kan het lage-vloeroppervlak worden doorgetrokken tot tussen de achterwielen.

12.3.4 Vermijdingskosten

Bij een olieprijs van 36 €/bbl (kosten diesel 0,30 €/l excl. belasting) worden door (TU Graz, 2006) vermijdingskosten van rond de 150 €/ton berekend.

12.3.5 Synergie met andere gebieden

Indien de batterij voldoende capaciteit en vermogen heeft kan bij lage snelheden puur elektrisch worden gereden. Dit kan voordelen hebben voor het lokale milieu, bijvoorbeeld in binnensteden. Vergroting van de actieradius in puur elektrische mode gaat echter wel ten koste van het energetisch rendement en de CO₂-emissie van het voertuig. Enerzijds wordt het voertuig zwaarder door de grotere batterij en anderzijds wordt het aandrijflijnrendement slechter doordat een groter deel van de door de generatorset opgewekte energie via de batterij naar de wielen gaat (en dus last heeft van het beperkte laad/ontlaad-rendement van de batterij).

Hybride aandrijving is niet perse schoner dan conventionele. Zeker bij diesel-hybride leidt de gemiddeld hogere belasting van de motor enerzijds tot een beter rendement maar anderzijds ook tot hogere NO_x-emissies. Deze kunnen overigens tegenwoordig met SCR-deNO_x technologie sterk worden gereduceerd, waarbij de constantere belasting van de motor in hybride bedrijf wel mogelijkheden biedt om ofwel met een goedkopere regeling tot voldoende lage emissies te komen of met een normale regeling tot lagere emissies te komen dan bij SCR-deNO_x op een motor in een conventionele aandrijflijn. Hybride aandrijving werkt op deze manier wel als 'enabling technology' die er voor zorgt dat de toegepaste uitlaatgasbehandelingstechniek beter functioneert.

12.4 Brandstofcellbussen

Er wordt nu reeds geëxperimenteerd met brandstofcellbussen op waterstof. Deze optie valt vanwege de toepassing van waterstof deels onder de categorie alternatieve brandstoffen (zie hoofdstuk 13), maar de brandstofcel an sich is een alternatieve, energie-efficiënte aandrijftechnologie.

Bussen zijn vanuit technisch oogpunt in principe een interessante toepassing voor brandstofcellen. Het hoge deellastrendement van brandstofcellen zal bij (stads)bussen tot een hogere verbruikswinst leiden dan in veel andere HD-toepassingen. Ook is het lokaal emissievrije karakter van waterstofaandrijving interessant voor stadsbussen. En stadsbussen kunnen toe met één of een beperkt aantal tanklocaties.

Sinds de markt voor stedelijk openbaar vervoer in Nederland en verschillende andere Europese landen is geliberaliseerd is de druk op kostenverlaging en eco-

nomische efficiëntie in het stedelijk busvervoer echter sterk toegenomen. Waar stedelijk OV vroeger als een interessante niche kon worden beschouwd voor marktintroductie van nieuwe milieuvriendelijke technieken is dat inmiddels niet meer zo. Het is op dit moment niet mogelijk om uitspraken te doen over de ontwikkeling van rendement en kosten van brandstofcellbussen zodat deze optie hier niet in hetzelfde detail kan worden beschreven als de hierboven genoemde technische maatregelen.

12.5 Inschatting van absolute reductiepotentiëlen voor bussen op basis van het GE-scenario

In Tabel 18 wordt het resultaat weergegeven van een indicatieve berekening van de absolute reductiepotentiëlen in 2030 van toepassing in Nederland van een aantal van de in dit hoofdstuk beschreven opties om de CO₂-emissies van bussen te reduceren. De tabel bevat ook resultaten voor verhoogde bijmenging van 2^e generatie biobrandstof (20%). Deze optie wordt nader besproken in hoofdstuk 13. Om de effecten van toepassing van biobrandstoffen te kunnen verrekenen is het reductiepotentieel berekend op basis van geschatte WTW CO₂-emissies. Voor conventionele diesel zijn deze een factor 1,195 hoger dan de directe TTW CO₂-emissies (op basis van gegevens uit (Concawe, 2006)).

Uitgangspunt voor de berekening is de ontwikkeling van volume en CO₂-emissies zoals beschreven in het WLO GE-scenario ((MNP, 2006a), zie ook Bijlage B). Reductiepotentiëlen voor verschillende opties worden gestapeld toegepast op de gemiddelde CO₂-emissiefactor voor bussen in 2030 volgens het GE-scenario (900 g/km). Het relatieve reductiepotentieel van een maatregel wordt steeds toegepast op de in dezelfde rij vermelde CO₂-emissiefactor in de kolom "2030 baseline TTW-emissie", die het resultaat is van de daarboven reeds toegepast reducties t.o.v. de GE-basisemissiefactor voor 2030.

Omdat in het GE-scenario het volume van busvervoer min of meer constant blijft, zijn de relatieve reducties t.o.v. de 2030 baseline gelijk aan de reducties t.o.v. 2005.

Tabel 18 Indicatieve schatting van reductiepotentiëlen van maatregelen bij bussen, t.o.v. baseline op basis van GE-scenario (toelichting zie tekst)

Bussen

reductie-optie	TTW reductie	WTT reductie	2030 baseline TTW emissie	aandeel in vloot	reductie-potentieel WTW	over-blijvende emissie WTW 2030	reductie t.o.v. GE baseline 2030	reductie t.o.v. 2005
	[%]	[%]	[g/km]	[%]	[kton]	[kton]	[%]	[%]
GE-baseline			900,0			712		724
zuiniger motor	5,0%	0,0%	900,0	100%	36	676	5%	7%
LRRT	3,0%	0,0%	855,0	100%	20	656	8%	9%
reductie luchtweerstand	3,0%	0,0%	829,4	25%	5	651	9%	10%
hybride bussen	15,0%	0,0%	823,1	100%	98	554	22%	24%
zuinig rijden	5,0%	0,0%	699,7	100%	28	526	26%	27%
bijmengen 20% 2e gen. biobrandstof	0,0%	17,3%	664,7	100%	91	435	39%	40%



12.6 Specifieke beleidsmaatregelen voor zuinige bussen

12.6.1 Instrumenteerbaarheid

Het gebruik van zuinige bussen kan vanuit de overheid gestimuleerd worden middels criteria m.b.t. brandstofverbruik of CO₂-emissies die worden opgenomen in bestekken voor aankoop van bussen of aanbesteding van openbaarvervoerdiensten. Deze criteria kunnen specifiek de toepassing van hybride aandrijving of andere technieken voorschrijven of kunnen sturen op het halen van bepaalde objectieve duurzaamheidscriteria m.b.t. brandstofverbruik of emissies van broeikasgassen.

In het laatste geval kan een vereist maximaal brandstofverbruik of een maximale CO₂-emissie worden voorgeschreven. Verschillende bussen kunnen redelijk goed worden vergeleken op basis van computersimulaties die gebruik maken van een gemeten motorkenveld en voor de bussen specifieke data m.b.t. frontaal oppervlak (en evt. c_w -waarde indien beschikbaar), bandenmaat, overbrengingsverhoudingen van de versnellingsbak, et cetera. Met een computermodel wordt dan de CO₂-emissie van de bussen berekend voor het rijden over een gespecificeerde ritcyclus (snelheid-tijd diagram). Voor Nederland is voor deze specifieke toepassing bijvoorbeeld een Dutch Urban Bus Driving Cycle beschikbaar die door TNO is ontwikkeld. In andere landen zijn andere cycli voorhanden.



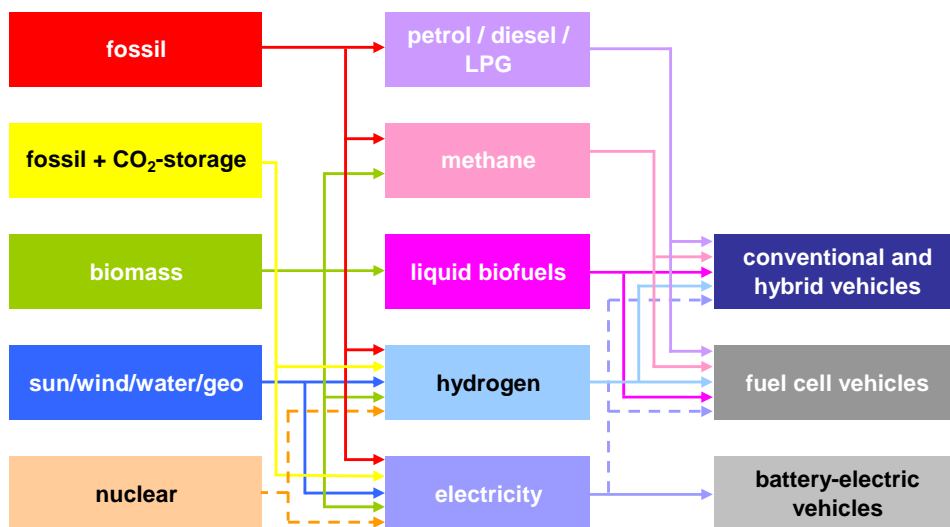
13 Alternatieve brandstoffen

13.1 Inleiding

Het huidige verkeer- en vervoersysteem is in hoge mate afhankelijk van op aardolie gebaseerde brandstoffen (benzine, diesel, LPG, kerosine, stookolie). Figuur 61 laat zien dat voertuigen in principe echter kunnen rijden op een veel groter scala aan secundaire energiedragers die gemaakt kunnen worden uit een minstens zo groot aantal primaire energiebronnen. Een belangrijke route voor vermindering de CO₂-emissies van transport is de toepassing van CO₂-arme of CO₂-neutrale brandstoffen en elektriciteit.

Alternatieven voor de korte termijn zijn LPG, aardgas en biobrandstoffen. Opties voor de lange termijn zijn geavanceerde biobrandstoffen, waterstof en elektriciteit. Een belangrijk voordeel van zowel elektriciteit als waterstof is dat deze energiedragers kunnen worden geproduceerd uit alle beschikbare primaire energiebronnen, dus uit fossiele energie (al dan niet in combinatie met CO₂-opslag), biomassa, duurzame energie zoals zonne- en windenergie en uit kernenergie.

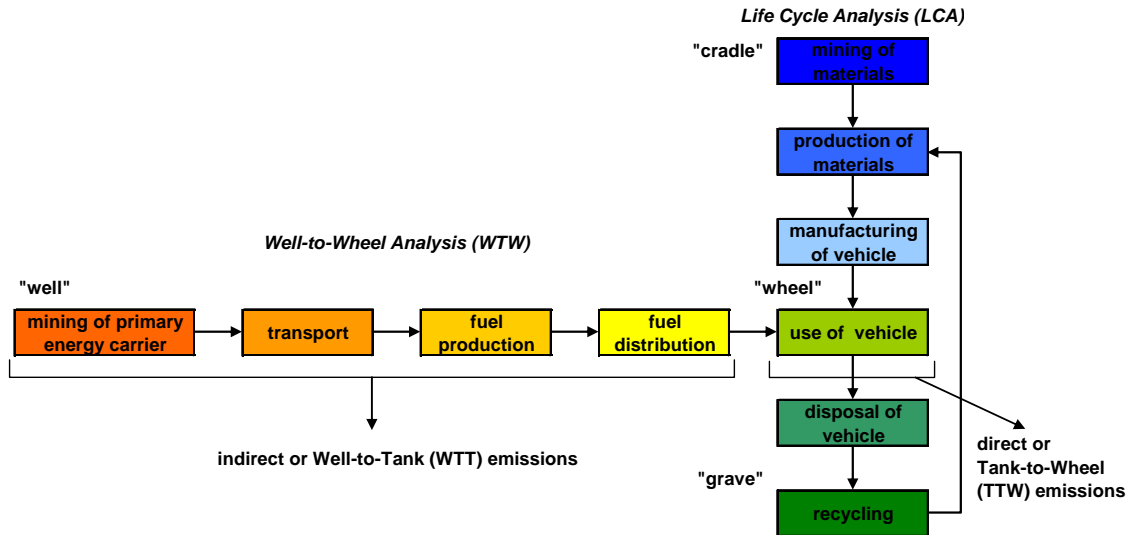
Figuur 61 Verschillende routes van primaire energiebronnen via secundaire energiedragers naar finale toepassingen met verschillende aandrijflijnen in de transportsector



Bij de beoordeling van alternatieve energiedragers in het licht van vermindering van broeikasgasemissies is het van belang om niet alleen naar de directe emissies te kijken die door het voertuig worden geproduceerd ('Tank-to-Wheel' (TTW)), maar naar de emissies in de gehele productieketen van de energiedrager ('Well-to-Wheel' (WTW)). Dit is geïllustreerd in Figuur 62. Voor verschillende brandstoffen zijn daarbij vooral ook emissies van CH₄ en N₂O van belang. Bij alle ketens is het energetisch rendement van de keten van belang omdat dit de economische rentabiliteit sterk bepaalt. Dit geldt ook voor duurzame energiedragers

omdat de inputs daarvoor (bijv. biomassa en elektriciteit uit windmolens of fotovoltaïsche zonnecellen) nog lange tijd schaars en duur zullen zijn.

Figuur 62 Illustratie van de concepten 'well-to-wheel' (WTW) analyse van energieketens en 'life-cycle analysis'(LCA) van producten



13.2 Personenauto's op LPG en aardgas

13.2.1 Wat houdt de optie in?

Een ottomotor kan behalve op benzine ook op gasvormige brandstoffen rijden. LPG is in Nederland reeds op grote schaal in gebruik. Het gebruik van aardgas als brandstof (in de vorm van 'compressed natural gas' of CNG) is technisch uitgerijpt maar staat qua markttoepassing in Nederland nog in de kinderschoenen. In landen als Italië is aardgas wel een veel toepaste brandstof.

LPG- en aardgasvoertuigen zijn in de regel bi-fuel voertuigen in de zin dat ze zowel op benzine als LPG of aardgas kunnen rijden. De voertuigen bevatten dus twee parallelle brandstofinjectiesystemen en naast een benzinetank ook een hogedruktank voor opslag van LPG of aardgas. LPG- en aardgasinstallaties kunnen af-fabriek worden geleverd maar ook naderhand worden ingebouwd (retrofit). Behalve aanpassingen aan het voertuig is ook extra infrastructuur nodig voor de distributie van gasvormige brandstoffen.

Retrofit-installaties zijn vooralsnog niet toepasbaar op benzinemotoren met directe inspuiting. Af-fabriek gasvoertuigen zullen dus waarschijnlijk een grotere rol spelen in de toekomst. Met deze fabrieksvoertuigen zal het ook beter mogelijk zijn om aan toekomstige emissie-eisen te voldoen en om de emissieperformance in de praktijk ook op het vereiste niveau te houden. Aardgas is in principe zeer geschikt voor toepassing in direct ingespoten motoren en biedt daarbij ook mogelijkheden voor verdere verbetering van het motorrendement.



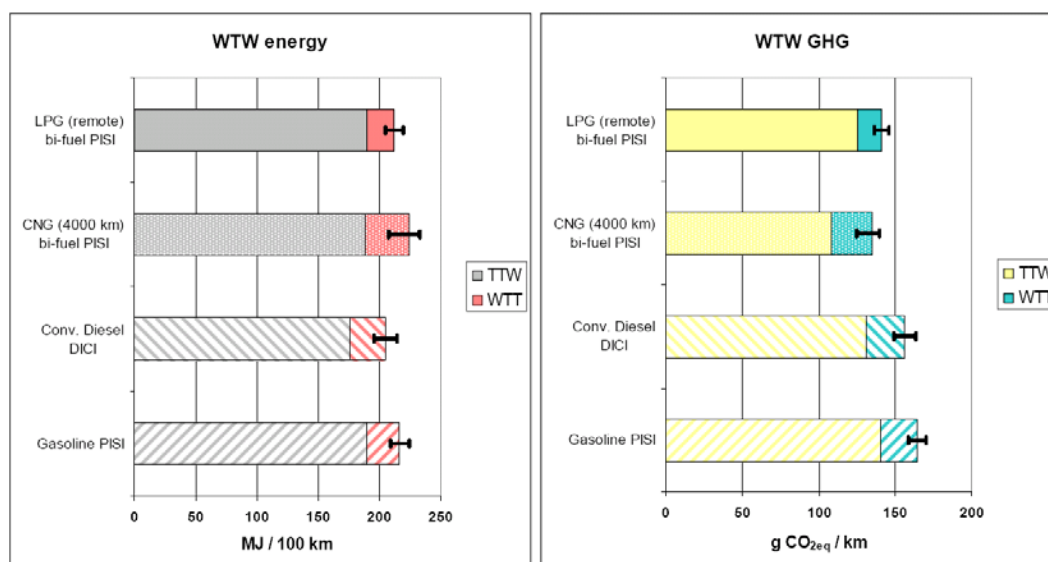
13.2.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

LPG

Qua Well-to-Wheel CO₂-emissie zit LPG tussen benzine en diesel in, m.n. door de gunstiger C/H-verhouding van de brandstof. Goede WTW getallen voor Nederland zijn overigens niet beschikbaar. Nederlandse LPG is deels een bijproduct van olieraffinage en deels een bijproduct van aardgaswinning. Voor de eerste optie zijn uit buitenlandse studies wel getallen beschikbaar (bijv. (Concawe, 2006)), maar voor de tweede optie niet. Aanvankelijk leverde toepassing in auto's van LPG als bijproduct van olieraffinage een win-win situatie op in de zin dat auto's er schoner van werden en het in raffinaderijen energetische en economische optimalisatie mogelijk maakte. Inmiddels zijn sinds de introductie van de 3-wegkatalysator LPG-auto's niet meer significant schoner dan benzine-auto's en wordt LPG ook op grote schaal gebruikt als grondstof in de chemische industrie. De rationale voor toepassing van LPG in transport is dus sterk verminderd.

Wanneer LPG wordt gebruikt die als bijproduct vrijkomt bij de winning van olie op afgelegen locaties, kan de WTW CO₂-reductie t.o.v. benzine groter zijn omdat gasvormige bijproducten op deze oliewinlocaties vaak worden afgefakkeld. De vraag is echter wat de beschikbare productievolumes voor deze bron van LPG zijn en of het, gegeven de mogelijke andere toepassingen, noodzakelijk of economisch interessant is om de toepassing van LPG in auto's te stimuleren als middel om deze bron van LPG te kunnen benutten.

Figuur 63 WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van LPG-voertuigen (op remote LPG) vergeleken met benzine, diesel en aardgas volgens Concawe (2006)



Bron: Concawe, 2006.

Op grond van de WTW CO₂-emissies kan LPG echter in principe op korte termijn een bijdrage leveren aan het verminderen van de CO₂-emissies van het wegverkeer. In de Nederlandse context heeft LPG echter al een significant aandeel in de markt. Dit aandeel was het laatste decennium sterk geslonken door de populari-

teit van de moderne, direct ingespoten dieselmotor, maar veert recent weer wat op door de hoge brandstofprijzen. Hoewel het mogelijk lijkt om de productie van automotieve LPG in Nederland nog te vergroten (AFCG, 2003), lijkt binnen de huidige beleidskaders een sterke vergroting van het aandeel LPG in de markt in Nederland geen reële optie. In andere Europese landen zou dit wel het geval kunnen zijn.

Op middellange termijn profiteert LPG in principe van dezelfde ontwikkelingen als beschreven in paragraaf 9.2, in die zin dat de WTW CO₂-emissie van LPG-voertuigen sterk kan afnemen door verlaging van het energiegebruik op voertuig-niveau. Kanttekening daarbij is wel dat het toepassen van retro-fit LPG-installaties op DI benzinemotoren in principe niet mogelijk is.

Indien het aandeel LPG zou worden verhoogd om CO₂-reductie te bewerkstelligen, dan is de volgende vraag of deze stap ook een logische opvolging kan krijgen in een langere termijn transitie naar een duurzame energievoorziening. Dit zou kunnen indien LPG ook uit duurzame bronnen kan worden geproduceerd. In principe levert het Fischer-Tropsch proces een waaier van producten op die ook een aandeel propaan en butaan bevat. FT-diesel uit biomassa levert dus (een) LPG (-achtige brandstof) als bijproduct. Directe toepassing daarvan in de transportsector zou op systeemniveau tot een verbetering van het rendement kunnen leiden. De vraag is echter of het economisch ook interessant is, niet alleen vanwege de kosten van LPG-voertuigen en de aparte distributie-infrastructuur, maar ook vanwege de waarde van de outputs van het FT-proces voor andere (industriële) toepassingen. Op basis van de nu voorhanden zijnde literatuur is dit niet te beoordelen.

Aardgas

Aardgas heeft, gerekend over de hele 'well-to-wheel' keten (WTW) en afhankelijk van de herkomst van het gas, een tot 20% lagere CO₂-emissies dan benzine en scoort daarmee in sommige toepassingen zelfs iets beter dan diesel. De voordelen zijn het grootst wanneer aardgas uit de huidige mix van oorsprongsgebieden wordt gebruikt, waarbij een groot deel van het gas in Europa (of in NL in het geval van voertuigen die in NL rijden) wordt gewonnen. NL en Europa zijn inmiddels echter netto importeurs van aardgas geworden zodat de additionele vraag a.g.v. toepassing van aardgasvoertuigen zal worden gedekt uit extra import. Voor de korte en middellange termijn betreft dit aardgas dat gemiddeld over transportafstanden van zo'n 4.000 km wordt aangevoerd. Op de lange termijn zullen ook verder gelegen bronnen in beeld komen.

Bijmenging van biogas, synthetisch methaan uit biomassa of duurzaam geproduceerd waterstof biedt mogelijkheden voor het verlagen van de WTW CO₂-emissie van CNG op de lange termijn. De vraag is echter of dit perspectief een motivatie mag zijn voor stimulering van aardgas als autobrandstof in Nederland. De genoemde duurzame gasvormige brandstoffen die kunnen worden bijgemengd zullen nog lange tijd slechts in beperkte volumes beschikbaar zijn en leveren bij gebruik in andere aardgas gebruikende toepassingen (industrie, huishoudens, tuin-



bouw en elektriciteitsopwekking) door de lagere omzettingsverliezen in de keten waarschijnlijk tegen lagere kosten hogere CO₂-reducties op.

13.2.3 Voor- en nadelen

Qua voertuigprestaties doen moderne LPG- en aardgasvoertuigen niet meer onder voor voertuigen op benzine. Het belangrijkste nadelen van beide brandstoffen zijn de ruimte die wordt ingenomen door de extra brandstoftank en de beperktere actieradius bij rijden op gas. LPG-tanks kunnen sinds enige tijd worden geproduceerd in een vorm die kan worden ingebouwd op de plaats van het reservewiel. Die spaart kofferbakruimte, maar betekent wel dat er zonder reservewiel moet worden gereden.

Tabel 19 Additionele kosten en relatieve TTW CO₂-reductie van aardgasvoertuigen vergeleken met benzinevoertuigen met dezelfde stand van motor-, aandrijflijn- en voertuigtechniek

	NGVs compared to petrol vehicles		
	small	medium	large
add. manufacturer cost [€]	1450	1750	2050
add. retail price [€]	2090	2520	2950
TTW CO ₂ -reduction	22%	22%	22%

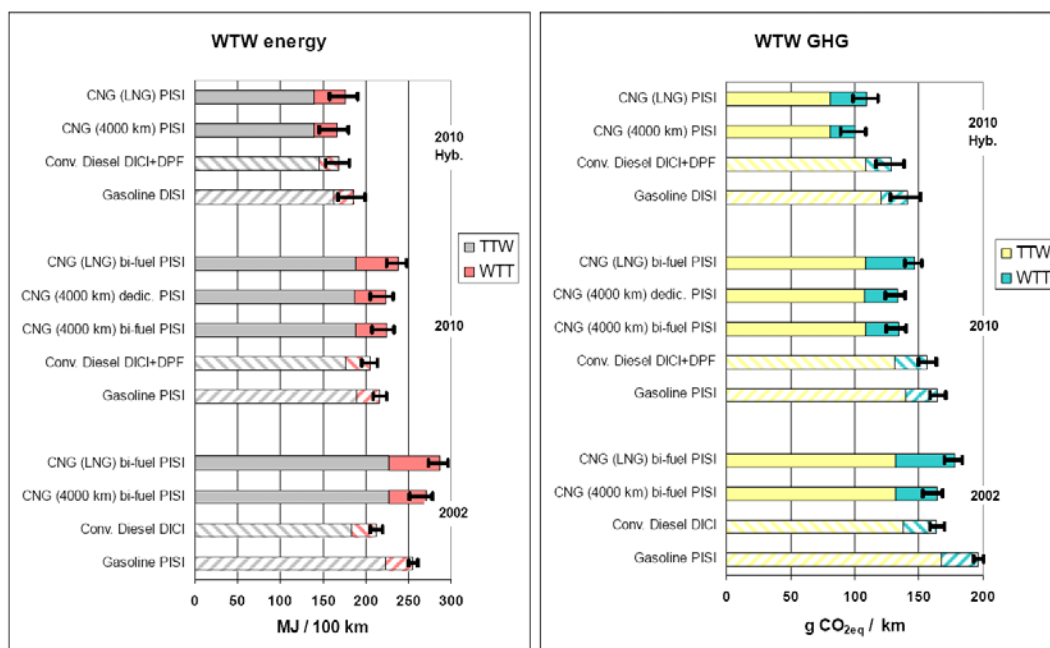
Bron: TNO, 2006a.
NGV = natural gas vehicle.

Tabel 20 WTW CO₂-emissies per voertuigkilometer van aardgasvoertuigen volgens TNO (2006a), data mede op basis van Concawe (2006)

	TTW		WTT	WTW	
	CO ₂ -emissions [gCO ₂ /km]		WTT CO ₂ -emission [gCO ₂ /gCO ₂ _TTW]	WTW CO ₂ -emission [gCO ₂ /km]	
petrol	148.0	100%	0.170	173.2	100%
diesel	125.8	85%	0.195	150.3	87%
CNG EU-mix	115.4	78%	0.149	132.7	77%
CNG 4000 km	115.4	78%	0.249	144.2	83%
CNG 7000 km	115.4	78%	0.386	160.0	92%

CNG = compressed natural gas.

Figuur 64 WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van aardgasvoertuigen volgens Concawe (2006)



N.B.: De halters geven de onzekerheidsmarge in de uitkomsten weer. De grijze resp. gele delen geven direct energiegebruik c.q. directe emissies weer (tank-to-wheel), de rode resp. blauwe delen de indirecte emissies bij winning, transport, productie en distributie (well-to-tank).

13.2.4 Vermijdingskosten

LPG

Concawe (2006) berekent alleen voor remote LPG (LPG die vrijkomt bij oliewinning op locaties die ver verwijderd liggen van markten voor de als bijproduct vrijkomende gassen) CO₂-vermijdingskosten. Deze komen uit op 672 €/ton voor een olieprijs van 25 €/bbl en 684 €/ton voor een olieprijs van 50 €/bbl, en zijn daarmee hoger dan de vermijdingskosten voor toepassing van CNG.

CNG

De vermijdingskosten voor CNG-voertuigen komen volgens TNO (2006a) uit op 200 - 300 €/ton. Concawe (2006) berekent nog hogere vermijdingskosten: uitgaande van aardgas dat per pijplijn over een afstand van 4.000 km wordt aangevoerd komen deze voor bio-fuel voertuigen op 579 resp. 444 €/ton voor olieprijsen van 25 resp. 50 €/bbl. Voor dedicated CNG-voertuigen zijn de vermijdingskosten zo'n 140 €/ton lager.

Deze hoge vermijdingskosten komen enerzijds door het beperkte CO₂-voordeel en anderzijds door het feit dat aardgas (op basis van de in TNO (2006a) en Concawe (2006) gehanteerde relatie tussen olieprijs en gasprijs) leidt tot hogere brandstofkosten per gereden kilometer wanneer gerekend wordt met brandstofkosten exclusief belastingen. Hoewel aardgasvoertuigen een marktrijpe technologie zijn en (bij het huidige belastingregime voor brandstoffen) voor gebruikers besparingen kunnen opleveren, lijkt een sterke rol voor aardgas in het CO₂-beleid voor de verkeerssector alleen gerechtvaardigd als daarmee ook andere energiebeleidsdoelen gediend kunnen worden.



Tabel 21 CO₂-verwijderingskosten voor aardgasvoertuigen

		average, M 2008-base	NGV EU-mix	NGV 4000km	NGV 7000km	gas cost [€/m ³]	petrol cost [€/l]
TTW CO ₂ -reduction	[%]		20.1%	20.1%	20.1%		
NEDC CO ₂ -emission	[g/km]	145	115	115	115		
real-world CO ₂ -emission	[g/km]	173	138	138	138		
WTW CO ₂ -emission	[g/km]	204	159	172	191		
WTW CO ₂ -reduction	[%]		22.4%	15.6%	6.4%		
add. ret. price minus tax	[€/veh]	0	1450	1450	1450		
CO ₂ abatement costs	[€/tonne]		243	347	852	0.32	0.21
	[€/tonne]		218	312	765	0.40	0.30
	[€/tonne]		187	268	658	0.49	0.41
	[€/tonne]		135	193	473	0.65	0.60

Bron: TNO, 2006a.

N.B.: Vergelijking van de CO₂-vermijdingskosten voor het realiseren van een CO₂-emissiereductie t.o.v. een gemiddelde conventionele middenklasse personenauto in 2008 (50% benzine / 50% diesel) door middel van de toepassing van aardgas, voor olieprijsen variërend van 25, 36, 50 tot 74 €/bbl en prijzen van benzine/diesel en aardgas die voor deze verschillende olieprijsen gelden.

13.2.5 Instrumenteerbaarheid

LPG-voertuigen zijn verankerd in het Nederlandse belastingregime. Het aandeel LPG-voertuigen kan worden beïnvloed door aanpassingen aan de accijns en de wegenbelasting waarmee de kantelpunten qua jaarkilometrage tussen LPG en benzine resp. diesel worden verschoven.

Aardgasvoertuigen kunnen worden gestimuleerd d.m.v. de volgende beleidsmaatregelen:

- gunstige prijsstelling van brandstof door accijnsvrijstelling of lage accijns;
- subsidie op aardgasvoertuigen of op retrofit inbouw van aardgassystemen;
- gunstig belastingregime voor aardgasvoertuigen m.b.t. BPM en wegenbelasting;
- CO₂-differentiatie van aanschafbelasting of houderschapsbelasting;
- opname van personenauto's in een gesloten of open emissiehandelsstelsel;
- stimulering van de realisatie van voldoende tank-infrastructuur.

Belangrijk bij m.n. subsidies en belastingtechnische maatregelen is dat een te stimuleren techniek op lange termijn 'zijn eigen broek moet kunnen ophouden' in die zin dat er uiteindelijk een robuuste business case moet zijn in afwezigheid van overheidsstimulering of met een niveau van bijvoorbeeld fiscale bevoordeling t.o.v. alternatieven dat in verhouding staat tot de maatschappelijke baten die de techniek brengt. In afwezigheid van accijns op aardgas zijn aardgasvoertuigen op dit moment in een aantal toepassingen op gebruikersniveau een kosteneffectieve maatregel. Wanneer aardgasvoertuigen een significant deel van het park gaan uitmaken ligt het voor de hand dat deze moeten gaan bijdragen aan het genereren van overheidsinkomsten. Dit zal ten koste gaan van de rentabiliteit op gebruikersniveau. De mate van belasting van aardgas als motorbrandstof is echter een politieke keuze.

13.2.6 Synergie met andere gebieden

LPG en aardgas staan in de belangstelling als schone alternatieve brandstoffen. Door toepassing van de 3-wegkatalysator en verscherping van emissienormen is t.o.v. benzine het milieuvoordeel van LPG en aardgas m.b.t. luchtkwaliteit echter nog maar zeer beperkt. In de toekomst zal dit verschil nog kleiner worden. In de praktijk worden de milieuvoordelen van LPG deels teniet gedaan door de slechte betrouwbaarheid en duurzaamheid van retrofit LPG-installaties. Bij OEM LPG-voertuigen (af fabriek) zou dit probleem opgelost moeten zijn. In de praktijk moet dat echter nog bewezen worden.

Ten opzichte van diesel hebben LPG en aardgas wel lokale emissievoordelen, hoewel deze ook zullen slinken wanneer onder Euro 5 en 6 de emissie-eisen voor diesels verder worden aangescherpt.

13.3 Bussen op aardgas of LPG

13.3.1 Wat houdt de optie in?

LPG en aardgas zijn belangrijke alternatieven voor aandrijving van bussen. Beide brandstoffen vereisen toepassing van een otto-motor (vonk-ontsteking) en relatief volumineuze opslagtanks.

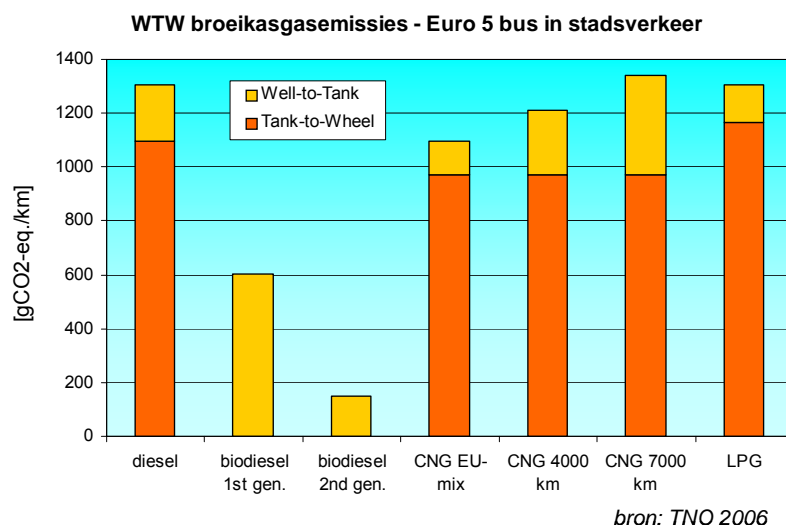
13.3.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Een ottomotor heeft een lager rendement dan een dieselmotor maar door de gunstiger C/H-verhouding van aardgas produceert een aardgasbus zowel op voertuigniveau (tank-to-wheel) als op ketenniveau (well-to-wheel) minder broeikasgasemissies dan een dieselbus op fossiele diesel, zoals te zien is in Figuur 65. Het voordeel wordt kleiner wanneer de gebruikte aardgas over grote transportafstanden wordt aangevoerd (zie ook paragraaf 13.2). Gegeven dat Nederland en de EU in toenemende mate netto importeurs van aardgas zijn en dit aardgas vooral uit Rusland komt is de optie van import met een transportafstand van 4.000 km de meest representatieve.

In Figuur 65 is biogas niet opgenomen. Toepassing van puur biogas zou leiden tot een WTW CO₂-reductie van meer dan 90% t.o.v. diesel. Bijmenging bij fossiel aardgas levert reducties in verhouding met het bijmengpercentage.



Figuur 65 WTW broeikasgasemissies van bussen op diesel, biodiesel, aardgas van verschillende gebieden van herkomst en LPG



Bron: TNO, mede op basis van data uit (Concawe, 2006).

13.3.3 Voor- en nadelen

Rijden op aardgas of LPG vereist een aparte tank-infrastructuur. Dit is bij bussen in de regel geen probleem omdat deze iedere dag in de remise terugkomen en daar getankt kunnen worden. Wel duurt het tanken langer waardoor het vullen van grotere aantallen bussen extra logistiek en meer werk vergt. Tot nu toe was levensduur en onderhoud nog een probleem bij bussen op aardgas en LPG maar dat lijkt bij de nieuwste generatie CNG-voertuigen minder het geval te zijn.

Het volume van de tanks is bij bussen minder een probleem. Deze kunnen op het dak worden ingebouwd en gaan zo niet ten koste van de ruimte voor passagiers.

13.3.4 Vermijdingskosten

Er zijn geen gegevens bekend over CO₂-vermijdingskosten voor toepassing van aardgas of LPG in bussen.

13.3.5 Instrumenteerbaarheid

Gebruik van m.n. aardgas in bussen kan vanuit de overheid gestimuleerd worden middels criteria die worden opgenomen in bestekken voor aankoop van bussen of aanbesteding van openbaar-vervoerdiensten. Deze criteria kunnen specifiek de toepassing van aardgas voorschrijven of kunnen sturen op het halen van bepaalde objectieve duurzaamheidscriteria m.b.t. luchtverontreinigende emissies (bijv. EEV-limiet of een al wel vastgestelde maar nog niet van kracht zijnde toekomstige Euro-norm) en emissies van broeikasgassen.

13.3.6 Synergie met andere gebieden

Een voordeel van gebruik van aardgas en LPG is dat een ottomotor kan worden uitgerust met een driewegkatalysator. Daardoor zijn de luchtverontreinigende emissies van CNG- en LPG-bussen veel lager dan van dieselbussen. De meeste CNG-bussen voldoen reeds aan de EEV-norm (Enhanced Environment-Friendly Vehicle) die iets strenger is dan Euro 5. Door toepassing van een roetfilter op een Euro 5 dieselmotor met SCR-deNO_x¹⁶ is het echter inmiddels ook mogelijk om de EEV-eis te halen met dieselmotoren.

13.4 Biobrandstoffen in het wegverkeer

13.4.1 Wat houdt de optie in?

Biobrandstoffen worden gemaakt van biomassa. Biomassa omvat zowel voor de energieproductie geteelde gewassen als reststoffen uit de land- en bosbouw. De CO₂ die bij verbranding van biobrandstoffen vrijkomt is eerder door planten opgenomen zodat een gesloten CO₂-kringloop ontstaat. De productie van biobrandstoffen kost echter ook (fossiele) energie. Daarnaast komen er bij de teelt van gewassen en bij andere delen van de keten ook emissies van CO₂ en andere broeikasgassen (o.a. CH₄ en N₂O) vrij, zodat de totale Well-to-Wheel ketenemissies niet nul zijn. Belangrijke biobrandstoffen zijn¹⁷:

- *Pure plantaardige olie* wordt onttrokken aan oliezaaden, zoals koolzaad en zonnebloempitten, door middel van mechanisch persen en/of extractie met een oplosmiddel. Deze olie kan gebruikt worden in specifiek hiervoor aangepaste dieselmotoren (dedicated engines).
- *Biodiesel* (in de EU met name RME, Rapeseed Methyl Ester op basis van koolzaad) wordt geproduceerd door plantaardige olie of afvalvetten te veresteren. Bij dit proces wordt methanol aan de olie toegevoegd om de glycerine hieruit te verwijderen. Het eindproduct lijkt qua eigenschappen op conventionele diesel en kan in een gewone dieselmotor worden gebruikt, puur of bijgemengd in conventionele diesel (aanpassingen van de motor zijn nodig bij een aandeel biodiesel groter dan 20-30%).
- *Bio-ethanol* wordt traditioneel geproduceerd door middel van fermentatie van suiker- en zetmeelhoudende landbouwgewassen, zoals suikerbieten en granen. Hierbij wordt de biomassa bij lage temperatuur en druk omgezet door middel van bacteriën of enzymen. Een opkomende technologie is de productie van bioethanol uit lignocellulose (houtachtige and grasachtige) biomassa, bijvoorbeeld populier, eucalyptus en miscanthus. Bio-ethanol is geschikt voor toepassing in (aangepaste) benzinemotoren (Otto-motoren), puur of bijgemengd bij conventionele benzine.
- *Biomethanol* wordt geproduceerd door biomassa te vergassen en dit gasmengsel vervolgens om te zetten in methanol door middel van methanolsynthese. Biomethanol is, net als bioethanol, geschikt voor toepassing als (ge-

¹⁶ Verwijdering van NO_x uit de uitlaatgassen d.m.v. Selective Catalytic Reduction (SCR). Daarbij wordt ureum ingespoten in het uitlaattraject dat m.b.v. een katalysator wordt omgezet in ammoniak. Dit reageert vervolgens met NO_x tot stikstof en water.

¹⁷ Beknopte beschrijving van biobrandstoffen is overgenomen van de Factsheet Biobrandstoffen van ECN: <http://www.ecn.nl/ps/rd-programma/projecten-en-themas-copy-1/factsheets/biobrandstoffen/>.



deeltelijke) vervanger van conventionele benzine. In bepaalde typen brandstofcellen kan methanol ook direct worden ingezet in plaats van waterstof. De geproduceerde elektriciteit drijft dan het voertuig via een elektromotor aan.

- *Bio-DME* (dimethylether) is een biobrandstof die qua eigenschappen lijkt op LPG en die geschikt is voor toepassing in (aangepaste) dieselmotoren. Bio-DME kan geproduceerd worden door middel van vergassing gecombineerd met DME-synthese (vergelijkbaar met de productie van methanol) of door middel van katalytische dehydratatie van biomethanol.
- *Bio-ETBE* (ethyl tertiair butylether) wordt geproduceerd door bioethanol te laten reageren met isobutyleen. ETBE wordt gebruikt als een additief in conventionele benzine om het zuurstofgehalte te verhogen (meestal bijgemengd tot 15%). Dit zorgt voor een vermindering van de emissies en verhoogt het octaangetal en verbetert daarmee de antiklopeigenschappen van de brandstof.
- *Bio-MTBE* (methyl tertiair butylether) wordt geproduceerd uit biomethanol en isobutyleen en heeft dezelfde toepassing als bio-ETBE.
- *Biogas* is het eindproduct van vergisting van biomassa. In dit proces wordt de biomassa biologisch afgebroken door micro-organismen, in een natte omgeving, bij lage temperaturen en zonder toevoeging van zuurstof. Voor toepassing als transportbrandstof, moet biogas opgewerkt worden tot een methaangehalte van 98%. Biogas kan dan gebruikt worden in een (aard)gasmotor.
- *Fischer-Tropsch diesel* wordt verkregen door biomassa te vergassen en dit gasmengsel vervolgens om te zetten naar een vloeistof door middel van het Fischer-Tropsch syntheseproces. Meestal is de synthese gericht op het verkrijgen van zoveel mogelijk wax (lange koolstofketens), waaruit door middel van hydrocracking diesel fracties worden geproduceerd. Het eindproduct kan toegepast worden in dieselmotoren en in alle proporties bijgemengd worden in conventionele diesel.
- *SNG (Substitute Natural Gas)* kan geproduceerd worden door verschillende vergassingstechnieken, gevolgd door een methanatiestap, welke zorgt voor een hoger methaangehalte in het gas. Het eindproduct is vergelijkbaar met aardgas en kan in (aard)gasmotoren worden toegepast.
- *Biowaterstof* kan geproduceerd worden door middel van vergassing (zie biomethanol, Fischer-Tropsch diesel, SNG) of vergisting (zie biogas). Na vergassing of vergisting van biomassa, vindt stoom reforming plaats, om een zo hoog mogelijk waterstofgehalte in het gas te verkrijgen. Biowaterstof kan in principe in een verbrandingsmotor worden toegepast, maar ook in brandstofcellen, gecombineerd met een elektromotor om het voertuig aan te drijven.
- *HTU-diesel* wordt geproduceerd door middel van een proces genaamd HydroThermalUpgrading. Deze conversietechnologie wordt alleen in Nederland ontwikkeld en is speciaal ontworpen om natte biomassa om te zetten in een vloeistof die lijkt op ruwe olie, meestal 'biocrude' genoemd. Hieruit kan een dieselachtige brandstof worden verkregen door HydroDeOxygenation (HDO) toe te passen.

Biobrandstoffen kunnen worden onderscheiden naar zgn. 1^e en 2^e generatie biobrandstoffen. De op dit moment beschikbare biobrandstoffen van de 1^e generatie worden geproduceerd uit olie- of zetmeelhoudende zaden of uit suikerhoudende

gewassen die ook voor voedselproductie geschikt zijn. Voorbeelden zijn ethanol uit suikerriet, suikerbieten, tarwe of maïs en biodiesel uit bijv. koolzaadolie. Er zijn op dit moment verschillende technologieën in ontwikkeling waarmee uit biologische afvalstromen of geteeld hout 2^e generatie biobrandstoffen kunnen worden gemaakt. Bekende voorbeelden zijn Fischer-Tropsch diesel, HTU-diesel, maar ook ethanol uit houtachtige biomassa.

Biobrandstoffen kunnen puur worden toegepast of worden bijgemengd bij conventionele benzine en diesel. Toepassing van pure biobrandstoffen vereist in de regel aanpassingen aan voertuigen en infrastructuur. De grootste bijdrage wordt derhalve verwacht van bijmenging, vooral ook omdat hiermee over de gehele vloot een CO₂-reductie wordt bewerkstelligd. Voor de korte tot middellange termijn staan daarom vooral bio-ethanol, bio-ETBE en biodiesel in de belangstelling.

Bestaande motoren stellen beperkingen aan het percentage ethanol en biodiesel dat kan worden bijgemengd. In de toekomst kunnen nieuwe motoren echter met geringe aanpassingen geschikt worden gemaakt voor hogere percentages bio-brandstof. Voor toepassing van ethanol tot percentages van 85% (E85) kan gebruik worden gemaakt van zgn. flex-fuel voertuigen, waarin een sensor het alcoholpercentage meet en de regeling van de motor daar op wordt aangepast. Synthetische biodiesel (BTL) is net als de nu reeds toegepaste GTL uit aardgas een zeer schone en hoogwaardige diesel die in principe geen beperkingen kent ten aanzien van het bijmengpercentage en zelfs gebruikt kan worden om betere kwaliteiten diesel te maken die nodig zijn voor de generatie geavanceerde motoren die aan toekomstige emissie-eisen moeten voldoen.

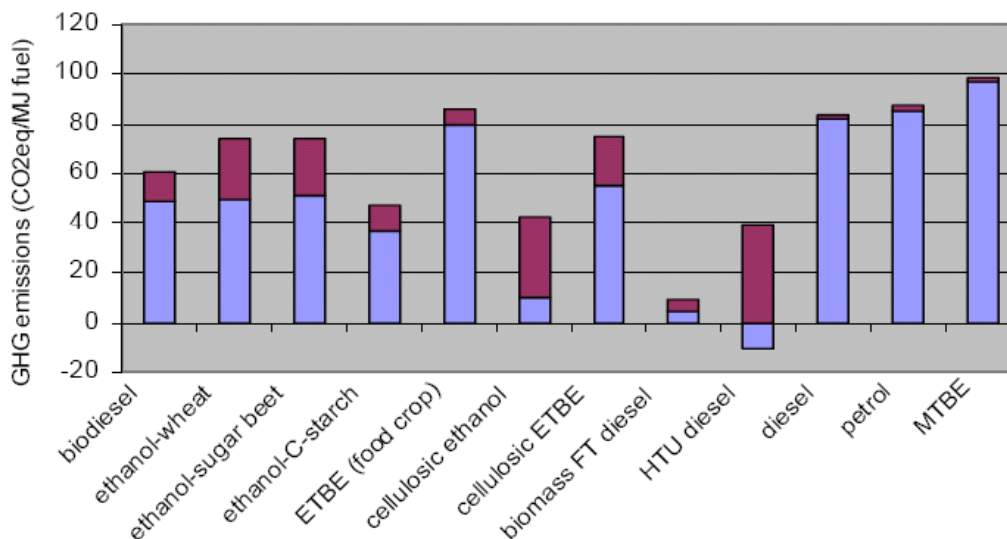
Pure Plantenolie (PPO) wordt in dit rapport buiten beschouwing gelaten omdat de WTW CO₂-voordelen zeer beperkt zijn en de brandstof niet compatibel is met moderne en toekomstige motortechnologie. Deze brandstof moet derhalve beschouwd worden als een niche-brandstof.

13.4.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Figuur 66 geeft een overzicht van de WTW CO₂-emissies van 1^e en 2^e generatie biobrandstoffen volgens (CE, 2005). Resultaten uit (Concawe, 2006) voor verschillende biobrandstoffen en productieketens worden gepresenteerd in Figuur 67 t/m Figuur 71. Grosso modo kan gesteld worden dat de WTW CO₂-reductie van 1^e generatie biobrandstoffen zo rond de 50% bedraagt maar ook veel minder kan zijn en dat met 2^e generatie biobrandstoffen reducties van 70 tot zelfs meer dan 90% mogelijk zijn. Bij de 1^e generatie biobrandstoffen is ethanol uit suikerriet een positieve uitzondering. Door de hoge opbrengsten van dit gewas in Zuid-Amerika levert deze optie een CO₂-reductie op die vergelijkbaar is met 2^e generatie brandstoffen op basis van in Europa geteelde biomassa.



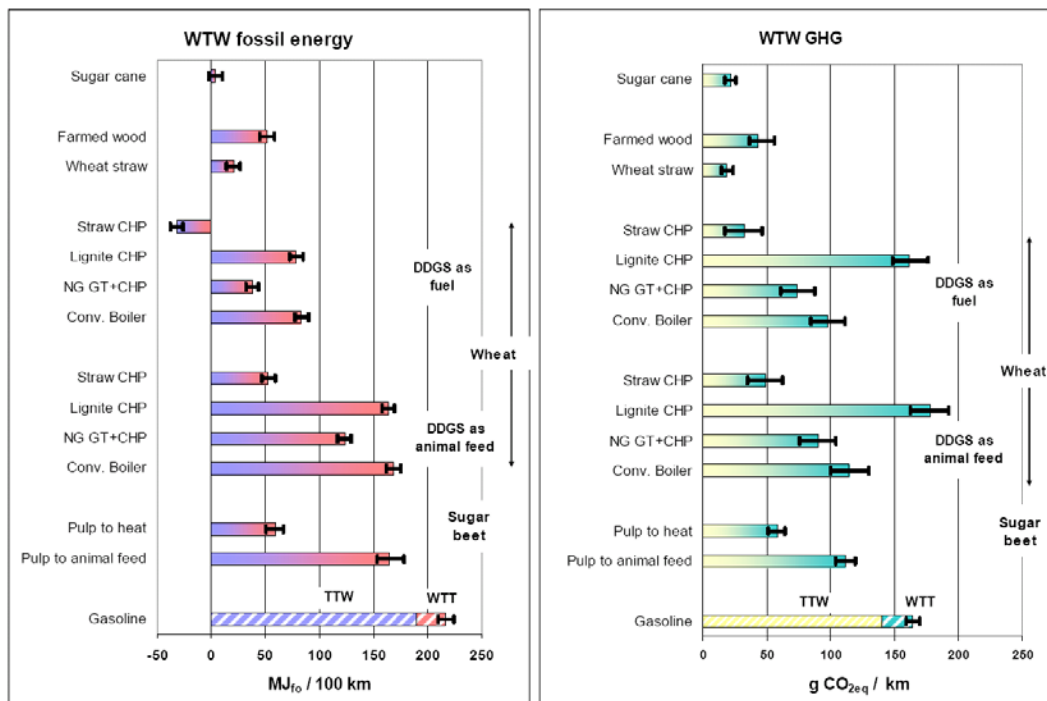
Figuur 66 Broeikasgasemissies per eenheid energie-inhoud (well-to-tank) van huidige en toekomstige biobrandstoffen vergeleken met benzine en diesel



Bron: E, 2005.

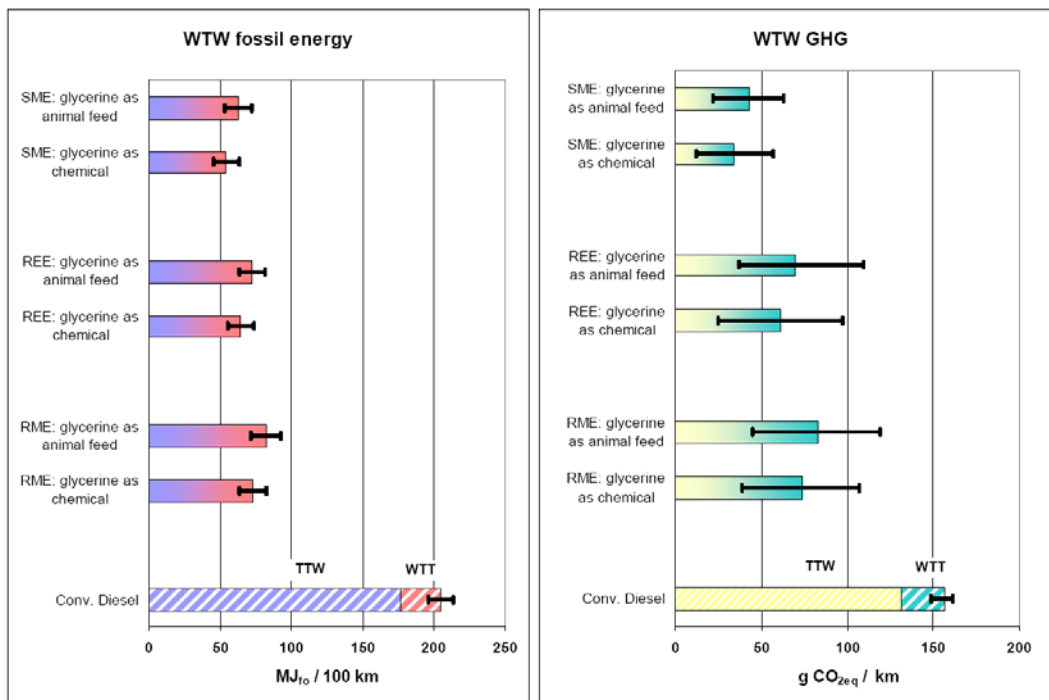
N.B.: De donkerrode balken geven de spreiding weer in resultaten van verschillende studies. Deze spreiding is deels aan de methodiek van die studies toe te schrijven maar vooral aan verschillen in de beschouwde productieprocessen

Figuur 67 WTW fossiel energiegebruik en broeikasgasemissies (GHG) van voertuigen op 1^e en 2^e generatie ethanol uit verschillende bronnen volgens Concawe (2006), vergeleken met conventionele benzine.



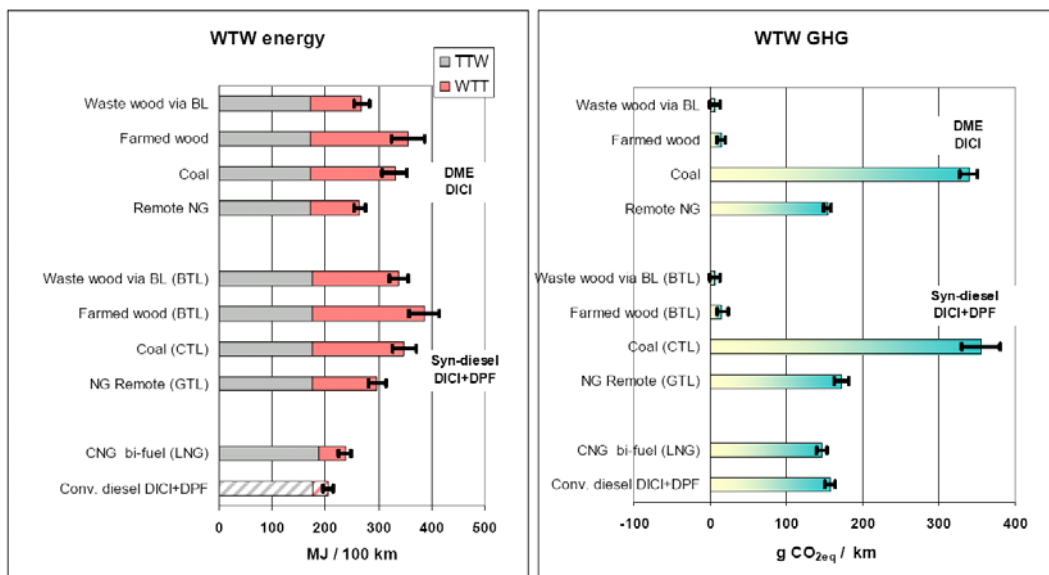
N.B.: De haltes geven de onzekerheidsmarge in de uitkomsten weer. CHG staat voor 'combined heat and power' oftewel gebruik van een warmtekrachtkoppeling op verschillende brandstoffen voor het produceren van proceswarmte. GT staat voor gas turbine. Verschillende opties worden daarbij ook vergeleken met een conventionele boiler op aardgas. DDGS staat voor 'distillers drier grain with solubles', een restproduct van ethanolwinning uit tarwe.

Figuur 68 WTW fossiel energiegebruik en broeikasgasemissies van voertuigen op 1^e generatie biodiesel uit verschillende bronnen volgens Concawe (2006), vergeleken met conventionele diesel



N.B.: De halters geven de onzekerheidsmarge in de uitkomsten weer. SME is in deze studie sun-flower methyl ester, REE is rapeseed ethyl ester en RME staat voor rapeseed methyl ester.

Figuur 69 WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van voertuigen op synthetische, 2^e generatie biodiesel uit verschillende bronnen volgens Concawe (2006), vergeleken met dezelfde brandstoffen geproduceerd uit fossiele bronnen en met conventionele diesel

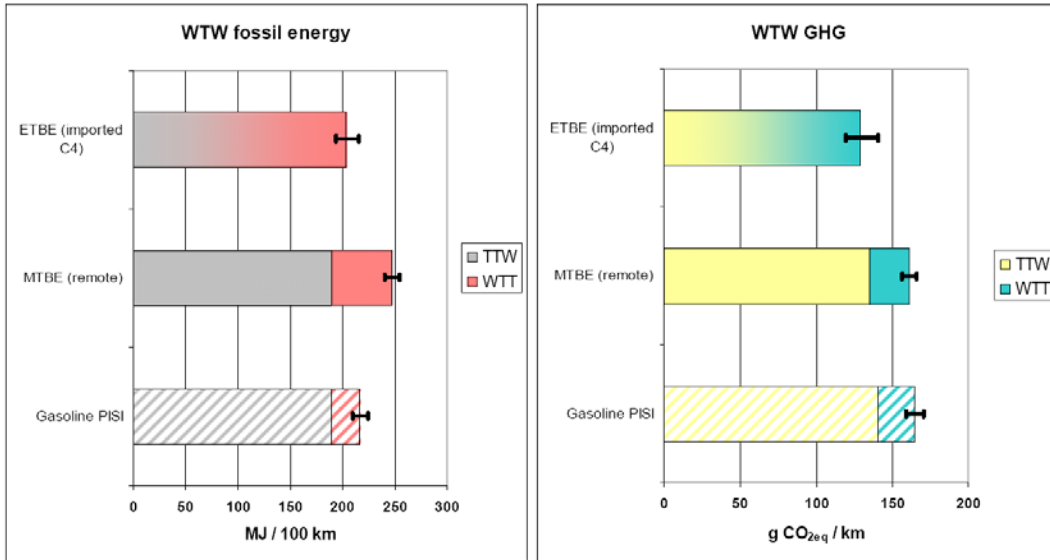


N.B.: De halters geven de onzekerheidsmarge in de uitkomsten weer. BL is black liquor, NG is natural gas (aardgas), BTL is biomass-to-liquid (Fischer-Tropsch), CTL is coal-to-liquid (Fischer-Tropsch), GTL is gas-to-liquid (Fischer-Tropsch), en LNG is liquid natural gas.

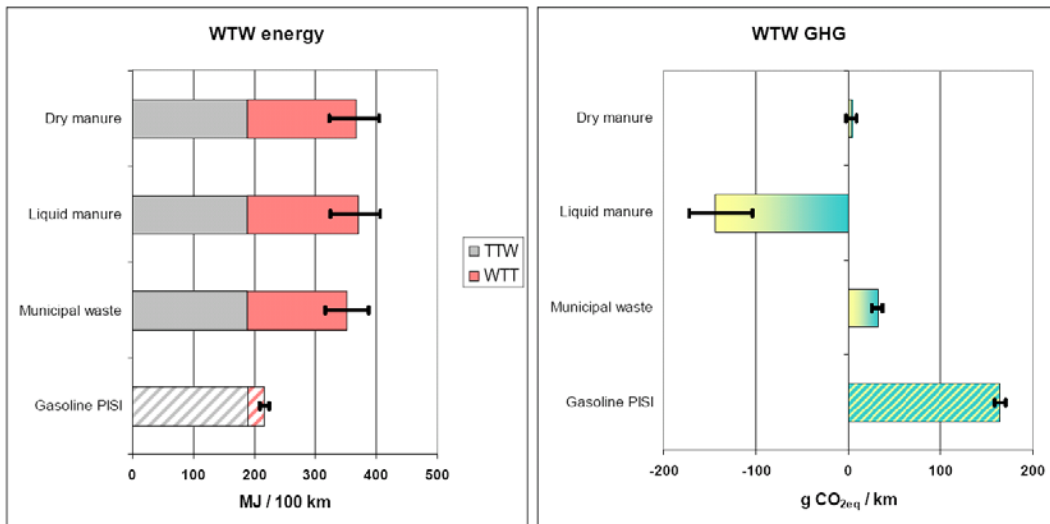


Figuur 69 laat zien dat synthetische diesel (GTL) of DME op basis van fossiele primaire energie (bijv. kolen of aardgas) leidt tot verhoging van de CO₂-emissies in de keten t.o.v. voertuigen op conventionele diesel.

Figuur 70 WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van voertuigen op MTBE en ETBE volgens Concawe (2006), vergeleken met conventionele benzine. De halters geven de onzekerheidsmarge in de uitkomsten weer



Figuur 71 WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van voertuigen op biogas uit verschillende bronnen volgens Concawe (2006), vergeleken met conventionele benzine. De halters geven de onzekerheidsmarge in de uitkomsten weer



Sommige Europese landen willen invulling geven aan de doelen van de Europese biobrandstoffen richtlijn door toepassing van MTBE en/of ETBE geproduceerd uit methanol of ethanol op basis van biomassa. Deze route biedt voordelen omdat MTBE en ETBE in hoge concentraties in benzine kunnen worden bijgemengd en de kwaliteit van de brandstof verbeteren. Figuur 70 toont echter dat volgens

Concawe (2006) de WTW CO₂-voordelen van deze optie zeer beperkt zijn omdat voor de productie van MTBE en ETBE ook fossiele inputs nodig zijn.

Biogas uit mest of afvalstromen daarentegen levert hoge CO₂-reducties (Figuur 71) maar is slechts beperkt beschikbaar.

13.4.3 Voor- en nadelen

Het huidige EU Biobrandstoffen Richtlijn houdt geen rekening met de efficiency en emissies in de energieproductieketen (WTW broeikasgasemissies). Dit leidt ertoe dat bedrijven zullen zoeken naar de goedkoopste oplossing en niet naar de meest duurzame (CE, 2006c). Zeker in het geval van stimulering van biobrandstoffen door de overheid geldt dat de WTW broeikasgasreductie per geïnvesteerde Euro gemaximaliseerd zou moeten worden. Braziliaanse ethanol uit suikerriet scoort daarbij significant beter dan 1^e generatie ethanol uit Europa, en in ontwikkeling zijnde 2^e generatie biobrandstoffen (bijv. ethanol uit houtachtige biomassa en Fischer-Tropsch diesel uit afval-biomassa) scoren beter dan 1^e generatie brandstoffen. Daarnaast zou de duurzaamheid van biobrandstoffen in een bredere context gecertificeerd kunnen worden, waarbij ook effecten op biodiversiteit, landgebruik (bijv. kappen van tropisch regenwoud), lokale economie, arbeidsomstandigheden en concurrentie met natuur en voedsel- en veevoerproductie worden meegenomen.

Veel studies tonen aan dat de wereldwijd beschikbare hoeveelheid land voor productie van biomassa beperkt is. Omdat inzet van biomassa voor bijv. elektriciteitsopwekking kosteneffectiever is dan inzet in de transportsector zal slechts een beperkt deel van de wereldwijd geproduceerde hoeveelheid biomassa beschikbaar zijn voor de transportsector. Voor het halen van de lange-termijn reductiedoelstellingen in de transportsector is het dus ook nodig dat voertuigen significant zuiniger worden en zuiniger worden gebruikt.

13.4.4 Vermijdingskosten

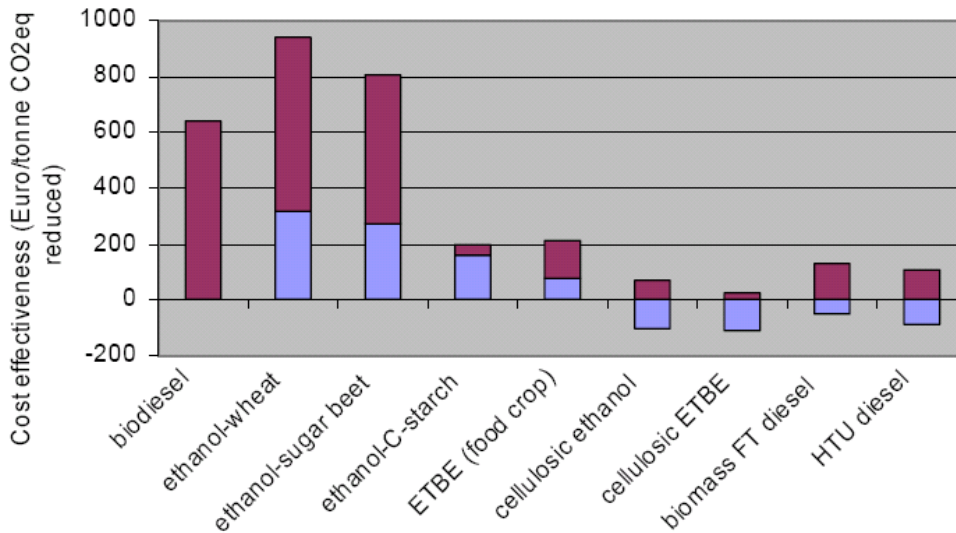
De kosteneffectiviteit van de huidige '1^e generatie' biobrandstoffen voor transporttoepassingen (bijv. ethanol uit graan of suikerbieten en biodiesel uit koolzaad) is relatief slecht, zowel t.o.v. andere CO₂-reducerende maatregelen in de transportsector als t.o.v. de toepassing van biomassa in bijvoorbeeld elektriciteitsproductie. Figuur 72 geeft een overzicht van de CO₂-vermijdingskosten van verschillende 1^e en 2^e generatie biobrandstoffen, zoals samengesteld in (CE, 2005) op basis van een groot aantal literatuurbronnen. De in deze grafiek getoonde negatieve vermijdingskosten ontstaan wanneer biobrandstof goedkoper wordt dan de benzine of diesel die ermee vervangen wordt.

Zelfs bij de huidige hoge olieprijsen zijn de vermijdingskosten van in Europa geproduceerde 1^e generatie biobrandstoffen enige honderden Euro's per vermeden ton CO₂-equivalenten (TNO, 2006a; CE, 2005a). Voor bijstoken van biomassa in een kolencentrale zijn de vermijdingskosten minder dan 100 €/ton (CE, 2006b), zoals duidelijk is uit de vergelijking in Figuur 73. Voor 2^e generatie biobrandstof-



fen zijn de vermijdingskosten veel lager en mogelijk zelfs negatief. Figuur 74 laat zien dat deze lagere kosten ook gepaard gaan met een veel groter CO₂-reductiepotentieel.

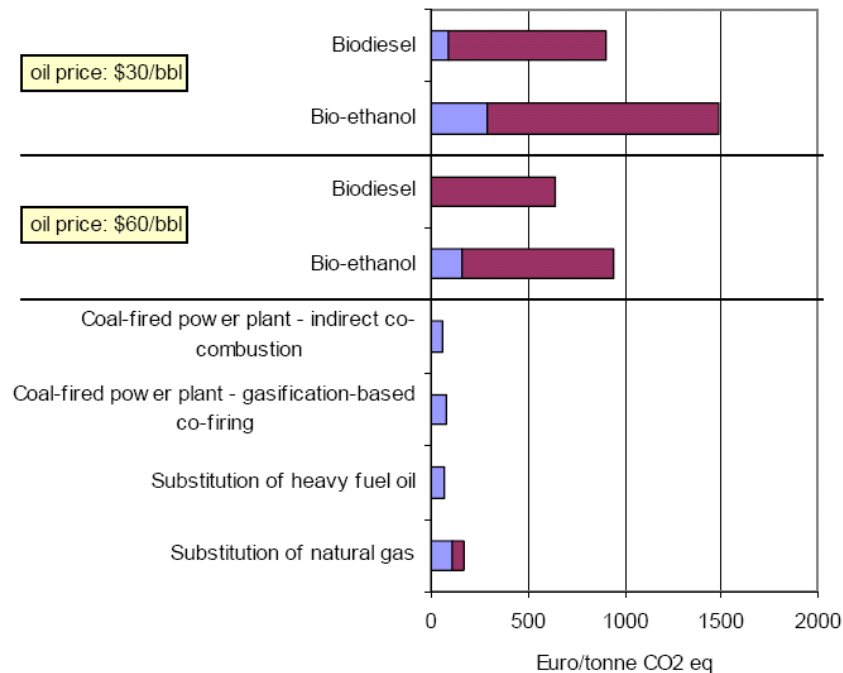
Figuur 72 Vergelijking van de kosteneffectiviteit van huidige en toekomstige biobrandstoffen



Bron: CE, 2005a,2005c.

N.B.: Berekend op basis van de kosten van benzine en diesel per september 2005 (dieselprijs = 0,539 €/liter, benzineprijs = 0,571.€/liter, beide excl. belastingen). Rode staven geven de spreiding in data weer.

Figuur 73 Schatting van de kosteneffectiviteit van broeikasgasreductie m.b.v. biomassa: vergelijking van biobrandstoffen met het gebruik van biomassa in de elektriciteitssector, voor twee verschillende olieprijsen en in de periode 2005-2010

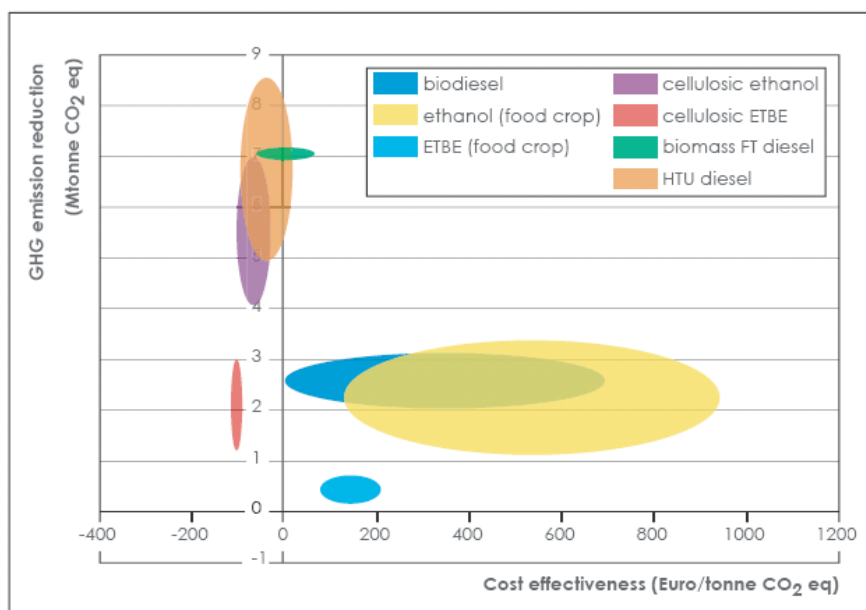


Bron: CE, 2006b.

N.B.: Rode staven geven de spreiding in data weer.

Figuur 74 Vermijdingskosten en CO₂-reductiepotentieel van verschillende biobrandstoffen in 2020. Vermijdingskosten zijn berekend op basis van de kosten van benzine en diesel per september 2005 (dieselprijs = 0,539 €/liter, benzineprijs = 0,571.€/liter, beide excl. belastingen)

Vergelijking van het broeikasgas reductiepotentieel van de verschillende biobrandstoffen in 2020, in het (hypothetische) scenario dat ze 20% van de wegtransportbrandstoffen vervangen



NB. Kosteneffectiviteit gebaseerd op de gemiddelde benzine- en dieselprijs van september 2005.

Bron: (CE, 2005a), data aangepast aan andere olieprijs. De breedte en hoogte van de gekleurde 'blobs' geven de onzekerheden in de data aan.

Bron: CE, 2006c.

13.4.5 Instrumenteerbaarheid

De toepassing van biobrandstoffen kan op verschillende manieren worden gestimuleerd:

- lagere accijns of accijnsvrijstelling voor biobrandstof, eventueel gedifferentieerd naar WTW-broeikasgasreductie en andere criteria die de duurzaamheid van de brandstof moeten waarborgen;
- verplichte bijmenging in benzine en diesel tot een vastgesteld percentage;
- opname van verkeer in een open of gesloten emissiehandelssysteem.

Stimulering via emissiehandel is bijvoorbeeld mogelijk in een zgn. upstream approach waarin emissierechten berusten bij oliemaatschappijen. Door het bijmengen van biobrandstoffen kunnen oliemaatschappijen de totale CO₂-emissie van de door hun verkochte brandstof verminderen. De kosten hiervoor worden verrekend in de brandstofprijs. Wordt onvoldoende biobrandstof bijgemengd om binnen het gestelde CO₂-plafond te blijven dan dienen emissierechten te worden bijgekocht waarvan de kosten eveneens in de brandstofprijs worden verrekend. In beide gevallen stimuleren de hogere brandstofprijzen consumenten om zuinige voertuigen aan te schaffen, een energiezuinige rijstijl toe te passen of minder te rijden.

Als onderdeel van een nieuwe brandstoffenrichtlijn (opvolger van Directive 98/70/EC) heeft de Europese Commissie in januari 2007 een voorstel gepubliceerd (COM(2007) 18) voor een verplichting aan brandstofproducenten om tus-



sen 2011 en 2020 de WTW broeikasgasemissies van de door hen geproduceerde brandstoffen met 1% per jaar te verminderen (dus 10% in 2020 t.o.v. 2010). Brandstofproducenten kunnen deze verplichting invullen door verbetering van de efficiëntie van winning en productie van conventionele brandstoffen en door verhoging van het aandeel brandstoffen met lage CO₂-uitstoot in hun verkopen (biobrandstoffen, aardgas, waterstof). Deze maatregel zal leiden tot een groter aandeel biobrandstoffen in de transportsector.

13.4.6 Synergie met andere gebieden

Er worden op dit moment voor verschillende biobrandstoffen voordelen geclaimd m.b.t. lokale emissies (o.a. NO_x, PM₁₀) en bijvoorbeeld verontreiniging / levensduur van de motor. Voor zover deze claims al worden gestaafd met emissiemeetresultaten zijn de resultaten in de regel niet overtuigend. Om statistisch significante uitspraken te doen over emissievoordelen van brandstoffen moet aan grote aantallen verschillende voertuigen gemeten worden. Dergelijke brede meetprogramma's zijn tot nu toe niet uitgevoerd en op basis van de voor handen zijnde emissiedata kunnen emissievoordelen van biobrandstoffen vooralsnog niet overtuigend aangetoond worden (GAVE, 2004). Indien dergelijke claims wel bewezen kunnen worden, leveren m.n. bijgemengde biobrandstoffen in principe wel een interessante kans om op korte termijn een significante bijdrage te leveren aan verbetering van luchtkwaliteit omdat ze toegepast kunnen worden op de gehele voertuigvloot. Overigens geldt ook hier dat in de tijd die nodig is om biobrandstoffen op grote schaal toe te passen auto's zoveel schoner zijn geworden als gevolg van verder voortschrijdende emissiewetgeving dat de absolute voordelen van alternatieve brandstoffen sterk verminderd zullen zijn.

13.5 Waterstof

13.5.1 Inleiding

De introductie van nieuwe aandrijftechnologie is een lange en moeizame weg en in de tussentijd verbetert conventionele technologie zich zo snel dat de voordelen van alternatieven deels 'verdamp't zijn voordat de nieuwe technologieën technisch en economisch marktrijp zijn. Conventionele techniek gedraagt zich als een 'moving target'. Dit geldt zeker voor lokale emissievoordelen, maar ook ten dele voor verbruiksvoordelen. De verbetering van conventionele technieken wordt overigens wel sterk gestimuleerd door de 'dreiging' die van betere alternatieven uitgaat. Het Californische ZEV-mandate, dat eisen stelde waaraan alleen met elektrische en brandstofcelauto's kan worden voldaan, is nooit in zijn beoogde vorm uitgevoerd, maar heeft autofabrikanten er wel toe aangezet grotere sprongen te maken in emissiereductie bij conventionele voertuigen. Waterstofvoertuigen bieden dus in principe mogelijk voordelen voor lokale luchtkwaliteit maar de absolute reducties die er mee bereikt kunnen worden tegen de tijd dat ze op grote schaal worden toegepast zullen beperkt zijn omdat conventionele voertuigen dan zulke lage emissies zullen hebben dat ze niet meer wezenlijk bijdragen aan luchtvervuiling ('zero-effect level'). De rationale voor grootschalige inzet van waterstof als transportbrandstof moet dus komen uit voordelen m.b.t. CO₂-

emissiereductie, energiediversificatie en vermindering van de afhankelijkheid van geïmporteerde olie.

13.5.2 Wat houdt de optie in?

Waterstof is een energiedrager die kan worden geproduceerd uit een groot aantal primaire energiebronnen (zie Figuur 61). Via thermisch/chemische processen (reforming/shift reactie) en gebruik makend van een katalysator kan waterstof worden gemaakt uit fossiele brandstoffen (evt. in combinatie met water voor levering van de benodigde waterstofatomen). Daarnaast kan het via elektrolyse uit water worden gemaakt. Bij gebruik van kernenergie als primaire bron kan waterstof ook direct m.b.v. de warmte van een kernreactor worden gemaakt zonder tussenkomst van elektriciteit.

Waterstof kan worden verbrand in een interne verbrandingsmotor of bijvoorbeeld een gasturbine. Een efficiëntere aandrijving wordt verkregen door gebruik te maken van brandstofcellen waarin waterstof via een katalytisch proces wordt gebruikt om met een hoog rendement elektriciteit te produceren. Met deze elektriciteit kan vervolgens een elektromotor worden aangedreven. Het (piek) omzettingsrendement van een brandstofcel ligt tussen de 50 en 60%. Het systeem dat nodig is om de brandstofcel van gecomprimeerde en geconditioneerde brandstof en lucht of zuurstof te voorzien verbruikt echter ook energie waardoor het rendement van brandstofcellen eerder tegen de 40% ligt. Een belangrijk voordeel bij voertuigtoepassingen is wel dat de brandstofcel zijn hoogste rendement levert bij lage belasting, terwijl dit voor verbrandingsmotoren juist bij hoge belasting gebeurt.

Waterstof kan onder hoge druk gasvormig worden opgeslagen maar ook als cryogene vloeistof (door afkoeling vloeibaar gemaakt gas, in het geval van waterstof bij -253°C). Beide opties hebben belangrijke nadelen. Door de lage energiedichtheid is voor gasvormige opslag een groot tankvolume nodig. Cryogene opslag vereist veel energie voor het afkoelen en vloeibaar maken van de waterstof en levert bijvoorbeeld bij inparkeren veiligheidsrisico's vanwege af-dampend waterstof dat naar de omgeving ontsnapt.

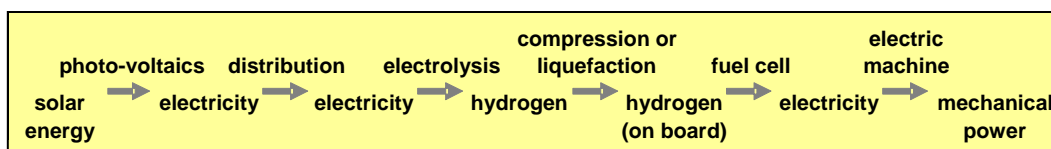
Brandstofcelvoertuigen kunnen ook rijden op koolstofhoudende brandstoffen. Eén optie daarvoor is het gebruik van een brandstofcel waarin deze brandstoffen direct kunnen worden omgezet. Dit zou kunnen met een vaste-oxide brandstofcel (maar die is niet erg geschikt voor wegvoertuigen) of met een direct-methanol brandstofcel. Ook kan m.b.v. een on-board reformer koolstofhoudende brandstof (bijv. methanol, ethanol, benzine of diesel) in waterstof worden omgezet. Dit levert een oplossing voor de beperkte actieradius van waterstofvoertuigen (zie paragraaf 13.5.4), maar het lage rendement van dergelijke reformers leidt er toe dat deze route geen netto energiebesparing en CO_2 -reductie oplevert (zie o.a. (Concawe, 2006)).



13.5.3 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Toepassing van waterstof in voertuigen is een relatief inefficiënte route voor inzet van duurzaam geproduceerde elektriciteit door de vele omzettingen en bijbehorende omzettingsrendementen in de keten (elektrolyse, transport, compressie/liquefactie voor opslag aan boord, omzetting in elektriciteit in de brandstofcel, zie ook Figuur 75).

Figuur 75 Energieketen voor rijden op middels PV uit zonne-energie geproduceerde waterstof



Resultaten van Concawe (2006) met betrekking tot WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van verschillende paden voor toepassing van waterstof in personenauto's zijn weergegeven in Figuur 76 t/m Figuur 78. Figuur 76 laat zien dat de meeste waterstofroutes op basis van fossiele brandstoffen leiden tot hogere broeikasgasemissies en energiegebruik dan die van conventionele voertuigen op benzine en diesel (weergegeven door de stippellijnen). Een beperkt aantal op aardgas gebaseerde routes alsmede verschillende op duurzame energie gebaseerde routes leiden wel tot netto CO₂-reducties. Figuur 77 laat zien dat bij thermische productie van waterstof op basis van aardgas de WTW CO₂-emissies zo'n 50% lager zijn dan die van conventionele voertuigen op benzine/diesel. Met waterstof op basis van biomassa, windenergie en kernenergie zijn WTW CO₂-reducties van meer dan 90% haalbaar. De WTW CO₂-emissies van brandstofcellen op uit biomassa geproduceerde waterstof zijn vergelijkbaar met of zelfs lager dan die van voertuigen met een verbrandingsmotor op 2^e generatie biobrandstof (zie Figuur 67 en Figuur 69 voor ethanol resp. biodiesel).

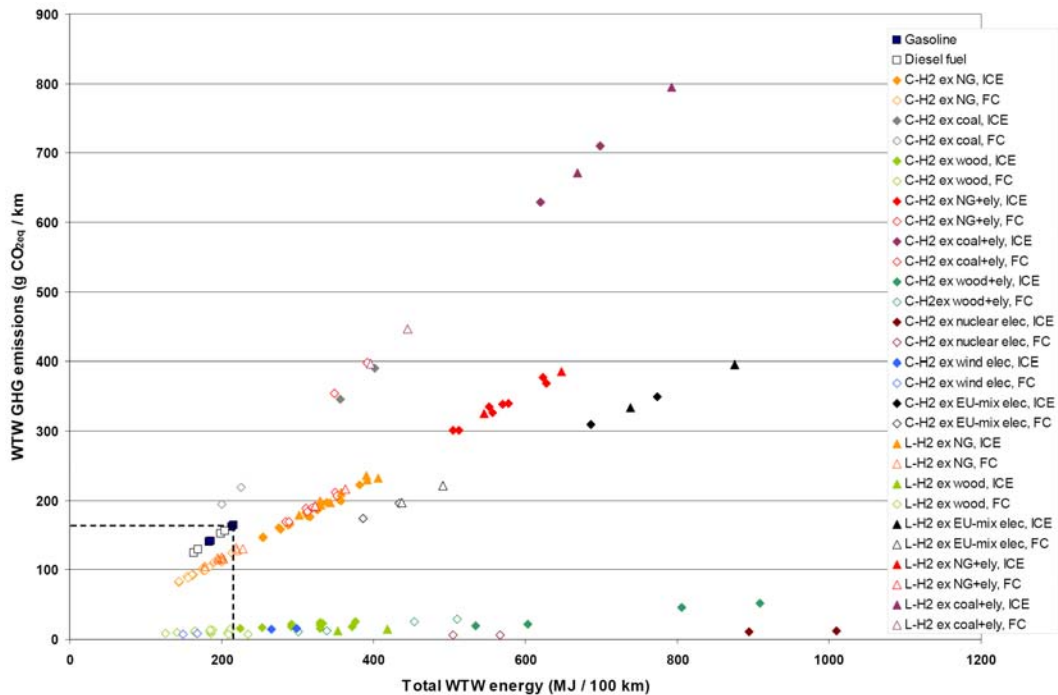
In het HyWays-project¹⁸ is een roadmap ontwikkeld voor de introductie van waterstof en waterstofvoertuigen in tien deelnemende Europese landen tussen nu en 2050. De resultaten van HyWays tonen op basis van de in het project gebruikte data en gemaakte veronderstellingen een lange-termijn toekomstbeeld waarin brandstofcelvoertuigen in combinatie met waterstof geproduceerd uit fossiele bronnen in combinatie met CO₂-opslag¹⁹ en deels uit duurzame bronnen een kosteneffectieve technische oplossing bieden voor het bereiken van significante CO₂-reducties (HyWays, 2006, 2007). Een samenvatting van de resultaten van het project is opgenomen in Bijlage H. Figuur 79 geeft de WTW-broeikasgasemissies van verschillende waterstofroutes volgens HyWays weer in vergelijking met benzine en diesel, uitgedrukt in g/kWh energie-inhoud. Een omrekening naar g/km is weergegeven in Figuur 81. Deze figuur laat zien dat bij productie van waterstof uit aardgas of kolen in combinatie met CO₂-opslag (CCS) de WTW-broeikasgasemissies de helft of meer lager kunnen zijn dan die van conventione-

¹⁸ <http://www.HyWays.de>.

¹⁹ CCS: Carbon Capture and Sequestration.

le voertuigen op benzine. Ook de brandstofkosten per kilometer kunnen op lange termijn lager uitvallen.

Figuur 76 WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van een groot aantal paden voor toepassingen van waterstof in voertuigen met verbrandingsmotor en brandstofcellen, vergeleken met een conventioneel voertuig in 2010 (stippelijnen) volgens Concawe (2006)

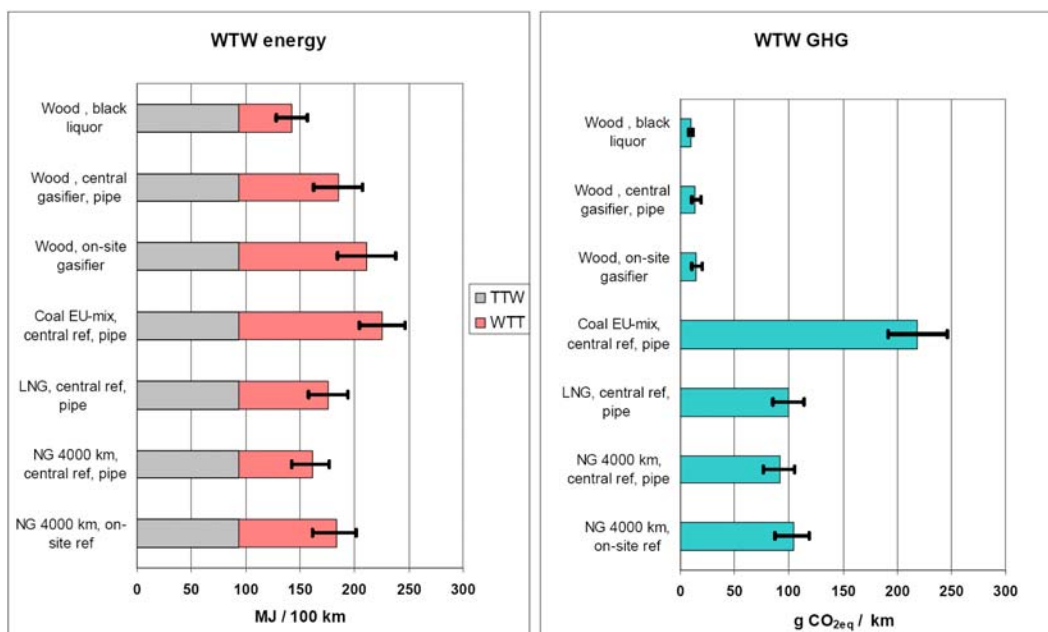


Afkortingen: C-H₂ = compressed hydrogen = onder druk opgeslagen waterstof, L-H₂ = liquid hydrogen = als vloeistof opgeslagen waterstof, FC = fuel cell =brandstofcel, ICE = internal combustion engine = verbrandingsmotor, NG = natural gas = aardgas, 'ex' staat voor: geproduceerd uit, 'ely' = elektrolyse, 'elec' = elektriciteit.

N.B.: Deze figuur bevat geen opties met CO₂-opslag.

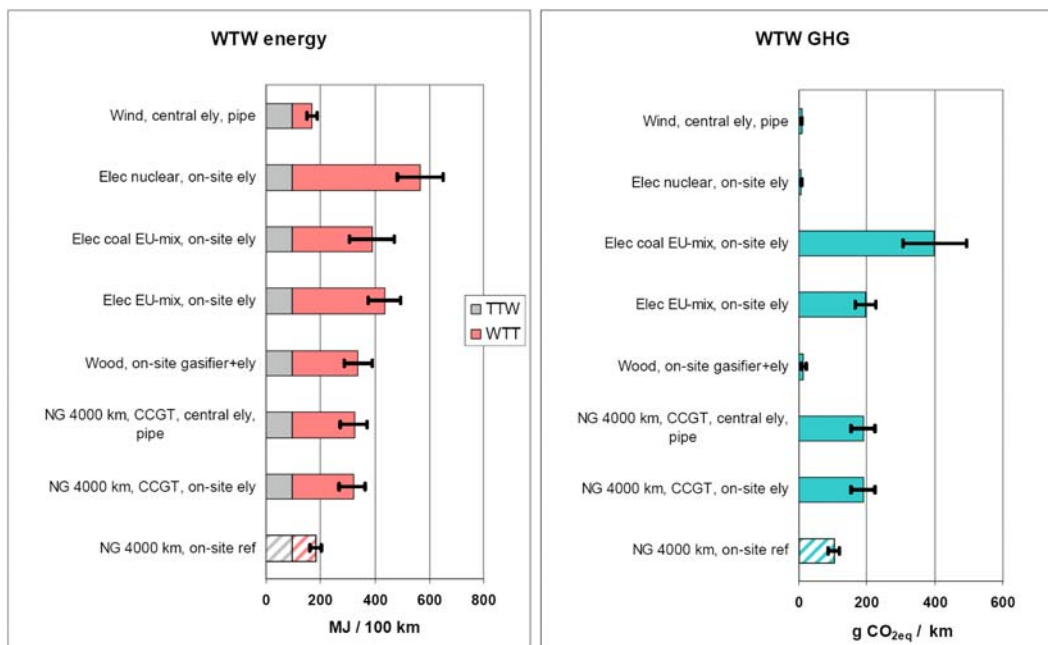


Figuur 77 WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van toepassing van waterstof, geproduceerd via verschillende thermische routes, in brandstofcelvoertuigen volgens Concawe (2006). De halteres geven de onzekerheidsmarge in de resultaten weer



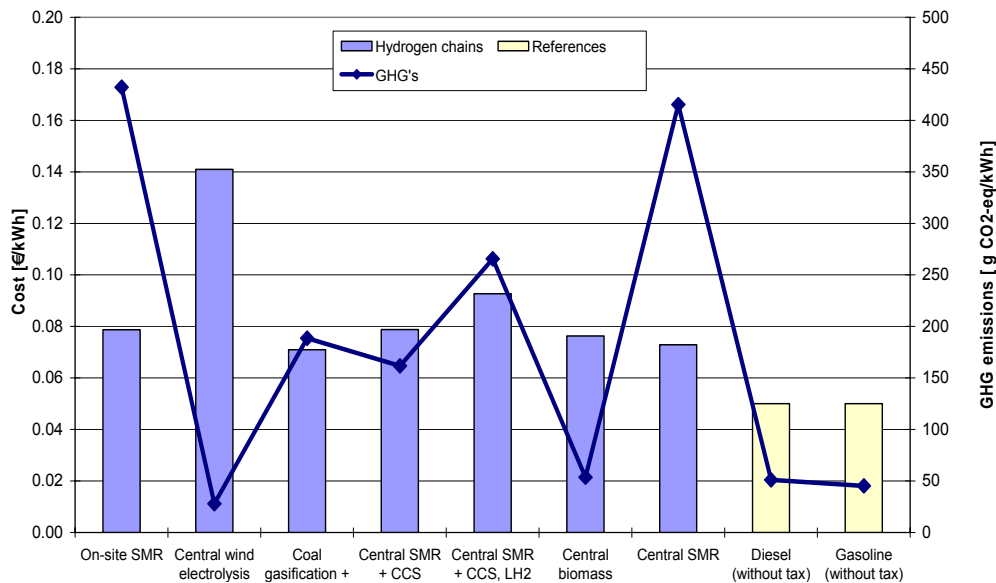
N.B.: Deze figuur bevat geen opties met CO₂-opslag.

Figuur 78 WTW energiegebruik en broeikasgasemissies van toepassing van waterstof, geproduceerd via elektrolyse uit verschillende primaire elektriciteitsbronnen, in brandstofcelvoertuigen volgens Concawe (2006)



N.B.: Deze figuur bevat geen opties met CO₂-opslag.

Figuur 79 WTW-brandstofkosten (in €/kWh) en WTW-broeikasgasemissies (in gCO₂-eq./kWh) in 2050 van via verschillende ketens geproduceerde waterstof vergeleken met benzine en diesel



Bron: HyWays, 2007.

N.B.: 'SMR' is steam methane reforming, ofwel productie van waterstof uit aardgas via een thermisch-chemisch proces.

13.5.4 Voor- en nadelen

Het belangrijkste nadeel van waterstofvoertuigen heeft te maken met de opslag van waterstof. Om voldoende actieradius mogelijk te maken zijn zeer volumineuze opslagtanks nodig die ten koste gaan van het nuttig te gebruiken volume van het voertuig. Dit speelt in versterkte mate in het goederenvervoer waar een grote actieradius is vereist en laadvolume bij voorkeur niet wordt opgeofferd aan brandstofopslag.

Een ander nadeel betreft de benodigde infrastructuur voor distributie en tanken van waterstof. Deze levert ook een kip-ei probleem bij grootschalige marktintroductie. Waterstofvoertuigen worden niet verkocht als er niet voldoende tankinfrastructuur is en deze tankinfrastructuur rendeert niet als er per dag niet voldoende voertuigen tanken. Op dit moment is in regio's met petrochemische industrie (bijv. in Rijnmond) reeds waterstofproductiecapaciteit beschikbaar die kan worden gebruikt ten behoeve van initiële nichetoeepassingen van waterstofvoertuigen. Er zijn implementatiestrategieën denkbaar (zie ook Bijlage H over het HyWays-project) waarin het kip-ei probleem van de waterstofinfrastructuur wordt opgelost door grootschalige toepassing van waterstofvoertuigen te beginnen in dergelijke regio's en deze van daar uit verder uit te rollen.

Een belangrijk voordeel van brandstofcelvoertuigen komt voort uit de elektrische aandrijving. Hiervoor is geen mechanische koppeling tussen energie-omzetter (in dit geval brandstofcel) en wielen nodig. Zeker wanneer elektromotoren in de wielen kunnen worden ingebouwd levert dit een grote ontwerpvrijheid voor de constructie van het voertuig.



13.5.5 Vermijdingskosten

Brandstofcellen zijn weliswaar energie-efficiënt en emissievrij maar vooralsnog ook heel duur. Een verbrandingsmotor kost ongeveer 50 €/kW. Brandstofcellen voor voertuigtoepassing kosten op dit moment rond de 1.500 €/kW. Deze bevatten 1g platina per kW, waarvan de kosten op dit moment meer dan 30 €/gram bedragen²⁰. Verdere kostenreductie van brandstofcellen wordt verwacht door vermindering van de benodigde hoeveelheid edelmetaal, het gebruik van goedkopere materialen voor separatorplaten en membranen en het toepassen van efficiënte productiemethoden. Het is echter zeer onzeker in hoeverre daarmee het niveau van 50 €/kW kan worden benaderd.

Concawe (2006) berekent CO₂-vermijdingskosten van personenauto's met brandstofcellen op waterstof. Voor een niet-hybride configuratie bedragen de geschatte meerkosten per voertuig zo'n € 10.000. Het lage ketenrendement van waterstof in voertuigtoepassingen beïnvloedt ook de kosteneffectiviteit negatief. Resultaten van Concawe (2006) voor verschillende waterstofproductieketens zijn weergegeven in Figuur 80. Ondanks de redelijk optimistische aannames in (Concawe, 2006) m.b.t. het voertuigrendement van brandstofcelvoertuigen liggen de vermijdingskosten rond de 500 €/ton. Op basis van CO₂-vermijdingskosten zal inzet van duurzaam of anderszins CO₂-neutraal geproduceerde elektriciteit in andere sectoren dan transport dus de voorkeur verdienen zolang deze energiebronnen duur en schaars zijn (CE, 2006b).

Op lange termijn kunnen brandstofcelvoertuigen echter significant goedkoper worden. Op basis van data uit de industrie en toepassing van leercurves schat HyWays (2007) dat brandstofcelvoertuigen op termijn zelfs goedkoper kunnen worden dan conventionele voertuigen. Dit is weergegeven in Figuur 82. In combinatie met brandstofkosten die ook lager zijn dan die van conventionele voertuigen (zie Figuur 81) leidt dit zelfs tot negatieve CO₂-vermijdingskosten. Belangrijk om op te merken is dat deze uitkomsten sterk afhangen van de in HyWays gemaakte veronderstellingen m.b.t.:

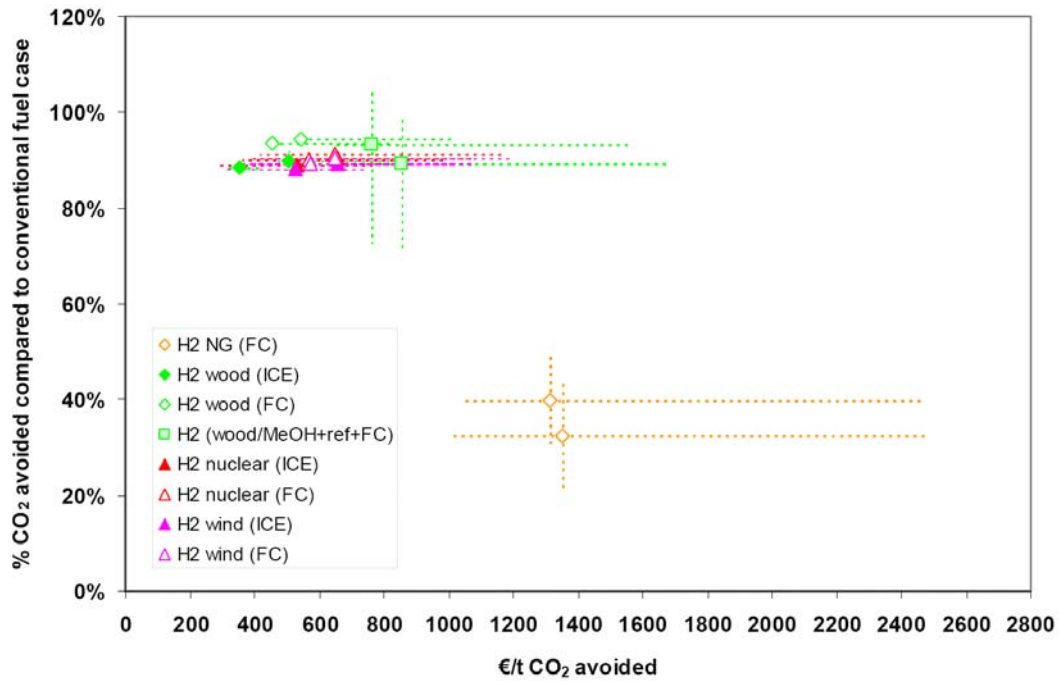
- de ontwikkeling van energieprijzen;
- het energetisch rendement van brandstofcelvoertuigen;
- de kosten van brandstofcelvoertuigen op lange termijn;
- de kosten en het energetisch rendement van infrastructuur voor productie en distributie van waterstof;
- de kosten en beschikbaarheid van CO₂-opslag als optie om de WTW CO₂-emissies van waterstof uit aardgas en kolen te reduceren.

Daarnaast geldt dat de beschreven kostendaling van brandstofcelvoertuigen het gevolg is van leereffecten die een functie zijn van de cumulatieve productie. Grootschalige inzet van waterstofvoertuigen is dus een voorwaarde voor het bereiken van een situatie waarin brandstofcelvoertuigen kunnen concurreren met andere alternatieven of zelfs goedkoper worden dan conventionele voertuigen. Deze grootschalige inzet is alleen mogelijk wanneer wordt geïnvesteerd in een grootschalige infrastructuur voor productie en distributie van waterstof. Deze in-

²⁰ Typische motorvermogens van personenauto's liggen tussen de 50 en 100 kW.

frastructuur zal in eerste instantie, wanneer er nog weinig waterstofvoertuigen op de weg zijn, onderbenut worden hetgeen tot hoge kosten voor de gebruikte waterstof leidt. In het HyWays-project zijn scenario's ontwikkeld om met dit kip-ei probleem om te gaan en om deze tijdelijke meerkosten te minimaliseren (HyWays, 2007).

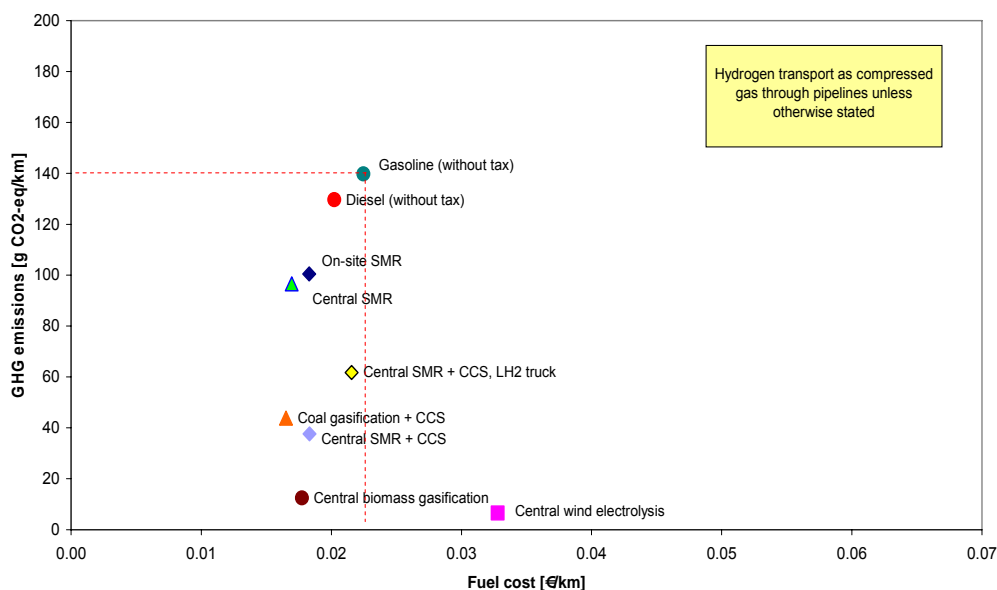
Figuur 80 CO₂-vermijdingskosten voor toepassing van waterstof uit verschillende energieketens in voertuigen met verbrandingsmotor en brandstofcellen bij een olieprijs van 50 €/bbl



Bron: Concawe, 2006.

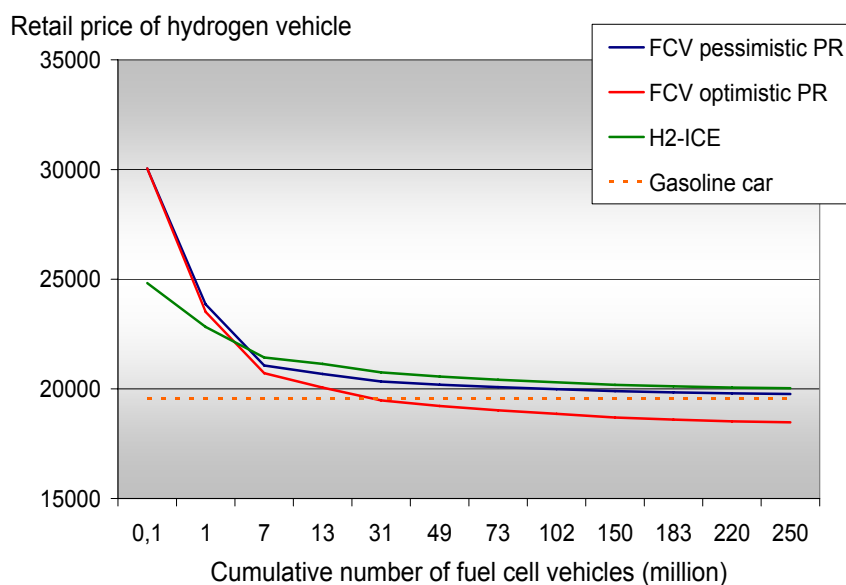


Figuur 81 WTW-brandstofkosten (in €/km) en WTW-broeikasgasemissies (in gCO₂-eq./km) van hybride brandstofcelvoertuigen in 2050 op via verschillende ketens geproduceerde waterstof vergeleken met een conventioneel voertuig op benzine (stand der techniek 2010)



Bron: HyWays, 2007.

Figuur 82 Leercurve voor de ontwikkeling van de kosten van brandstofcelvoertuigen als functie van het cumulatieve productievolume vergeleken met de kosten van een benzineauto's in 2010



Bron: HyWays, 2006, 2007.

13.5.6 Instrumenteerbaarheid

Voor de introductie van waterstof in transporttoepassingen is een breed opgezet beleid nodig dat tegelijkertijd de implementatie van een waterstofinfrastructuur stimuleert en de aanschaf van waterstofvoertuigen. Dit kan nationaal of internationaal gebeuren maar er wordt ook gedacht over regionaal beleid waar op geschikte locaties met voldoende voertuigdichtheid, beschikbaarheid van duurzame

energie en mogelijke synergie met andere toepassingen van waterstof of bestaande waterstofproductie (bijv. bij raffinaderijen) een 'hydrogen community' wordt gecreëerd met een lokale waterstofinfrastructuur en een lokale markt voor waterstofvoertuigen.

Gericht beleid of wetgeving om de toepassing van waterstof in transport af te dwingen is mogelijk maar lijkt niet voor de hand te liggen. In principe is het mogelijk om met zeer strenge CO₂-wetgeving of specifieke wetgeving m.b.t. Zero-Emission Vehicles (zoals in Californië) de introductie van waterstofvoertuigen af te dwingen. Naast CO₂-normen op voertuigniveau is ook een CO₂-normering van de productie van waterstof nodig om binnen een dergelijke regulerende aanpak te komen tot daadwerkelijke reductie van broeikasgasemissies.

Bij opname van transport in CO₂-emissiehandelssystemen kan op den duur de toepassing van waterstof in voertuigen interessant worden als het CO₂-plafond zodanig wordt aangescherpt dat de prijs van emissierechten gelijk wordt aan de CO₂-vermijdingskosten van waterstofvoertuigen (of andere transporttoepassingen). Maar zelfs in die situatie lijkt aanvullend overheidsbeleid zinnig om de eerste drempels m.b.t. inrichting van infrastructuur en de verkoop van voertuigen te slechten.

13.5.7 Synergie met andere gebieden

In 1997 beloofden verschillende autofabrikanten dat ze in 2003 met een brandstofcelvoertuig op de markt zouden komen. Inmiddels is de consensus dat dat niet eerder dan 2015 zal gebeuren en grootschalige toepassing van waterstof in wegtransport wordt door veel fabrikanten pas voor na 2030 voorzien. Tegen die tijd zijn de luchtverontreinigende emissies van voertuigen met een verbrandingsmotor zo laag ('zero-effect level') dat het 'zero-emission'-karakter van brandstofcellen geen significant voordeel meer is. Ook het rendementsvoordeel zal geslonken zijn. De rationale voor inzet van brandstofcellen en waterstof moet derhalve liggen in de mogelijkheid energie van verschillende bronnen in te zetten. CO₂-reductie kan dan worden bereikt door toepassing van fossiele bronnen met CO₂-opslag, kernenergie of duurzame energie en zal deels voortkomen uit energetische optimalisatie op systeemniveau. Waterstof kan bijvoorbeeld gebruikt worden als opslagmedium en zo dienen als buffer om de mismatch tussen de dag/nacht- en seizoensvariaties van de vraag naar energie en het aanbod vanuit duurzame bronnen op te vangen. Waterstof wordt daarmee meer een onderdeel van een 'all electric society' dan de basis van een 'waterstofeconomie'. De vraag is daarbij overigens nog wel of gebruik van de als buffer gebruikte waterstof in voertuigen vanuit systeemopbouw de meest voor de hand liggende toepassing is.



13.6 Elektriciteit

Inzet van duurzame opgewekte elektriciteit in elektrische voertuigen levert een veel efficiëntere route op dan inzet van dezelfde energie in brandstofcelvoertuigen met waterstof als secundaire energiedrager. Deze optie is echter alleen kansrijk als het op termijn lukt om batterijen goedkoper en betrouwbaarder te maken. Begin jaren '90 leken elektrische voertuigen op het punt van marktdoorbraak te staan. Verschillende fabrikanten begonnen met productie in kleine series. Toen echter de eisen van de Californische ZEV-mandaat werden afgezwakt en inzet van elektrische voertuigen daarvoor niet meer nodig was, bleken de beperkingen van elektrische voertuigen m.b.t. ondermeer actieradius, prestaties en oplaadtijd te groot om autonome marktintroductie mogelijk te maken. Voor 2030 wordt niet verwacht dat elektrische voertuigen een come-back zullen maken. We gaan derhalve hier niet verder in detail op deze optie in.

Inzet van elektriciteit opgewekt uit duurzame bronnen of uit fossiele bronnen in combinatie met CO₂-opslag in bestaande elektrisch aangedreven vervoerwijzen (trein, metro, tram, trolleybus) is een mogelijkheid om voor deze vervoerwijzen de CO₂-emissie per passagiers- of tonkilometer te verlagen. Op macro-niveau is echter een dergelijke koppeling van bron en gebruiker niet nodig voor het bereiken van CO₂-reductie door inzet van duurzame elektriciteit of elektriciteit uit 'schoon fossiel'.

13.7 Specifiek biobrandstoffenbeleid

13.7.1 Huidig beleid

De Europese Biobrandstoffen Richtlijn (2003/30/EC) verplicht EU-lidstaten beleid te implementeren om de introductie van biobrandstoffen te bevorderen. Niet-bindende doelen zijn 2% vervanging van conventionele brandstoffen voor 2005 en 5,75% voor 2010 op basis van de energie-inhoud van verkochte benzine en diesel. Het doel voor 2005 is echter niet gehaald en ook over het halen van de 2010-doelstelling bestaan twijfels.

In Nederland en de meeste Europese landen wordt invulling gegeven aan de Biobrandstoffen Richtlijn door veelal verplichte bijmenging van bio-ethanol en biodiesel bij benzine resp. diesel. Sommige landen hebben een voorkeur voor toepassing van MTBE of ETBE op basis van biomassa. In Zweden wordt met name ingezet op brede toepassing van E85.

13.7.2 Elementen voor toekomstig beleid

Een consistente strategie voor effectieve CO₂-reductie door gebruik van biobrandstoffen is uitgewerkt in (CE, 2006c). Een geleidelijke groei van de markt voor 1^e generatie biobrandstoffen in de periode tot aan introductie van 2^e generatie brandstoffen dient de komende jaren gestimuleerd te worden om investeringen in deze technologie te bevorderen en om de marktintroductie ervan te versnellen. Daarnaast kan met de huidige brandstoffen al nuttige ervaring worden

opgedaan door gebruikers, fabrikanten en overheden en kunnen op basis van praktische ervaring duurzaamheidsstandaarden worden ontwikkeld. Tegelijkertijd kan met R&D-subsidies de ontwikkeling van energetisch en economisch rendabele technieken voor productie van biomassa en van 2^e generatie biobrandstoffen worden gestimuleerd.

De markt voor toepassing van biobrandstoffen kan in het algemeen worden bevorderd door:

- het stellen van doelen in termen van een indicatief of verplicht aandeel biobrandstoffen verder te verfijnen;
- een CO₂-heffing op brandstoffen:
 - op basis van WTW CO₂-content van de brandstof;
- opname van transport in een emissiehandelssysteem.

De overgang van het huidige beleid op basis van verplichte bijmengpercentages naar een emissiehandelssysteem vereist goede timing en randvoorwaarden. Ook zijn nog verschillende handelssystemen denkbaar. Opname van (delen van) de transportsector in ETS is denkbaar (zie paragraaf 16.3). Eén van de mogelijkheden daarbij is een zgn. upstream approach waarbij emissierechten op het niveau van brandstofproducenten worden toegekend en verhandeld. Ook zijn gesloten systemen voor (delen van) de transportsector denkbaar.

Zoals reeds gemeld in paragraaf 13.4.3 is het van belang om bij beleid m.b.t. biobrandstoffen rekening te houden met milieu-effecten en mogelijke afwentelingseffecten in de productieketen. Certificering van de duurzaamheid van brandstoffen is dus een belangrijk element in ieder toekomstig biobrandstoffenbeleid (CE, 2006c, 2006d).



14 Niet-technische maatregelen in het wegverkeer

Aankoopgedrag beïnvloedt het gemiddeld energiegebruik van het voertuigpark. De totale emissies van het voertuigpark worden verder bepaald door gebruiksgedrag (aantal gereden kilometers) en rijstijl. Er zijn dus verschillende gedragsgerelateerde niet-technische maatregelen denkbaar om de emissies van de transportsector te verminderen. Het kopen van kleinere, zuinigere voertuigen en minder en anders rijden zijn alle drie triviale en vanuit een versimpeld economisch perspectief zeer kosteneffectieve opties voor reductie van CO₂-emissies. Verandering van gedrag komt echter niet vanzelf tot stand maar wel in respons op hogere energieprijzen en verschillende vormen van beleidsmaatregelen.

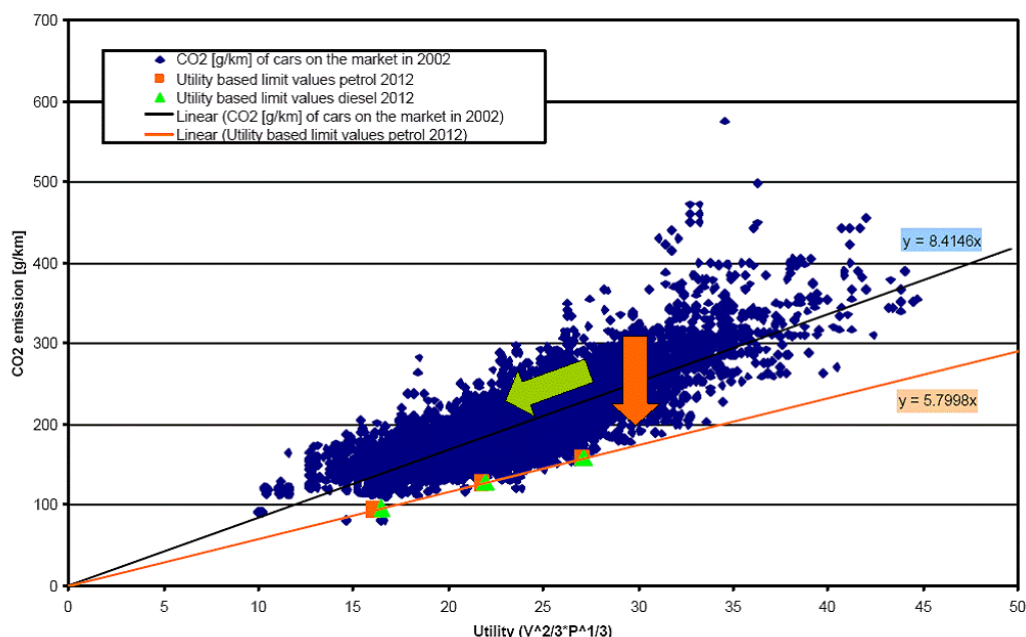
In dit hoofdstuk beschrijven we een aantal gedragsmaatregelen en andere niet aan voertuigtechniek gerelateerde maatregelen die CO₂-emissies van het wegverkeer kunnen verminderen.

14.1 Energiebewust aankoopgedrag

14.1.1 Wat houdt de optie in?

Auto's verbruiken meer brandstof naarmate ze groter zijn, meer wegen, meer vermogen hebben en meer energiegebruikende accessoires of hulpsystemen hebben. Daarnaast is er in het aanbod van voertuigen binnen een zelfde klasse qua volume, gewicht, vermogen en uitrustingsniveau een behoorlijke spreiding in het brandstofverbruik en de CO₂-emissies, zoals te zien is in Figuur 83. In deze figuur zijn de CO₂-emissies van in 2002 in Europa verkochte personenauto's uitgezet tegen een hypothetische 'utiliteitsvariabele' $V^{2/3} \times P^{1/3}$, als maat voor bruikbaarheid en nut van het voertuig, waarin volume (V) en motorvermogen (P) worden gecombineerd (figuur op basis van (IEEP, 2005)). Consumenten en vervoerders kunnen hun energiegebruik beïnvloeden door kleinere, lichtere en bijv. minder sportieve voertuigen te kopen (groene pijl in Figuur 83). Dit leidt echter wel tot welvaartskosten, zie paragraaf E.4 van Bijlage E omdat consumenten en gebruikers waarde c.q. nut toekennen aan de grootte, het comfort en de sportiviteit van voertuigen. Met behoud van dit nut kan echter ook al CO₂ gereduceerd worden door binnen de gewenste voertuigklasse een relatief zuinig model te kiezen (oranje pijl in Figuur 83).

Figuur 83 CO₂-emissies van nieuw verkochte personenauto's in Europa in 2002 (IEEP, 2005). De CO₂-emissie is uitgezet als functie van een hypothetische maat voor de utiliteit (= bruikbaarheid) van het voertuig (zie tekst)



Source: Derived from Polk Marketing data

Bron: IEEP, 2005.

14.1.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Met het kopen van de zuinigste auto binnen een klasse is ten opzichte van het gemiddelde (zwarte lijn in Figuur 83) een reductie mogelijk van ordegrrootte 10 - 20%. Met een verschuiving naar kleinere en minder zwaar gemotoriseerde voertuigen is in principe een nog grotere reductie mogelijk, maar realistisch gezien is het verstandig te veronderstellen dat het potentieel niet groter is dan eveneens 10-20%.

14.1.3 Voor- en nadelen

Een verschuiving naar zuiniger voertuigen zal niet autonoom plaatsvinden. Was dit wel het geval dan zou dit tot significant lagere kosten per kilometer leiden, waardoor een deel van de verbruikswinst waarschijnlijk gecompenseerd zou worden door een toename in mobiliteit. Dit effect treedt niet op wanneer de verschuiving wordt bewerkstelligd door een verhoging van de kosten van voertuigen of brandstof (bijv. door verhoging van belastingen).

14.1.4 Vermijdingskosten

Het is op basis van beschikbare informatie niet mogelijk de vermijdingskosten voor de genoemde opties in te schatten. Op basis van de formules in paragraaf E.1 komen de vermijdingskosten negatief uit. De optie van verschuiving naar kleinere en lichter gemotoriseerde voertuigen leidt echter zoals hierboven genoemd tot welvaartsderiving die verrekend zou moeten worden. Voor de optie



waarin binnen een klasse de zuinigste variant wordt gekozen hangen de vermijdingskosten af van het kostenverschil tussen zuinige en minder zuinige voertuigen binnen een klasse. Wanneer een voertuig zuiniger is door een lager gewicht of een soberder uitrustingsniveau dan zijn de vermijdingskosten negatief. Het kan echter ook zijn dat in het zuinige voertuig meer brandstofbesparende technologie is toegepast. Deze brengt kosten met zich mee die leiden tot hogere CO₂-vermijdingskosten.

Met betrekking tot welvaartskosten dient opgemerkt te worden dat deze grotendeels worden bepaald door de subjectieve waarde die consumenten en gebruikers aan bepaalde attributen van voertuigen toekennen. Dat waardestelsel is gegroeid door ruim een eeuw marketing door autofabrikanten en ervaring met voertuigen door consumenten. Dit waardestelsel is weliswaar zo robuust dat het niet op zeer korte termijn kan worden omgebogen, maar op langere termijn is het wel degelijk denkbaar dat door middel van effectieve marketing en andere instrumenten de voorkeur van consumenten zodanig kan worden beïnvloed dat energie en milieu een belangrijker factor worden in het beslissingsproces bij aankoop van een voertuig.

14.1.5 Instrumenteerbaarheid

Uit (ADAC, 2005) blijkt dat het in Europa ingevoerde brandstofverbruiklabel geen effect heeft op het aankoopgedrag van consumenten. Voor significante verschuivingen in aankoopgedrag zijn allereerst prijsmaatregelen nodig. Dit kan gebeuren middels een verhoging van brandstofaccijns, een algemene verhoging van BPM en/of wegenbelasting of een CO₂-differentiatie van deze belastingen.

Een CO₂-differentiatie van de BPM lijkt het meest voor de hand liggende middel om CO₂ en brandstofverbruik zwaarder mee te laten wegen in de aankoopbeslissing (TNO, 2006a). In Europa bestaan er echter voornemens om aanschafbelasting (behalve BTW) af te schaffen en alleen nog wegenbelasting te heffen op wegvoertuigen. De Europese Commissie is wel voorstander van CO₂-differentiatie van belastingen en heeft een voorstel voor een richtlijn daarvoor gepubliceerd (COM(2005)261).

14.1.6 Synergie met andere gebieden

De keuze voor kleinere en minder sportieve voertuigen zou in beperkte mate kunnen bijdragen aan de vermindering van andere problemen zoals ruimtegebruik en congestie. Ten aanzien van luchtverontreinigende emissies kunnen eveneens beperkte voordelen optreden, die niet zozeer samenhangen met de grootte van het voertuig (zware, dure auto's emitteren bij gelijk rijgedrag niet meer dan lichte, goedkope auto's), maar wel met de rijstijl die samenhangt met zwaarder gemotoriseerde voertuigen (afgezien van specifieke sportauto's is de zgn. kW/ton verhouding bij zwaardere en duurdere voertuigen hoger dan bij lichte voertuigen).

14.2 Het nieuwe rijden

14.2.1 Wat houdt de optie in?

Het Nieuwe Rijden (HNR), zoals dat in Nederland wordt gestimuleerd, omvat twee hoofdelementen: een energiezuinige rijstijl en optimale bandenspanning.

Energiezuinig rijden zorgt ervoor dat de motor zoveel mogelijk in dat deel van zijn kenvel wordt gebruikt waarin het rendement het hoogst is. Dit wordt bereikt door bij acceleraties het gaspedaal stevig in te trappen en tegelijkertijd zo snel mogelijk naar een zo hoog mogelijke versnelling op te schakelen. Rijden met constante snelheid dient ook in de hoogst mogelijke versnelling plaats te vinden. Verdere brandstofbesparing wordt bereikt door een anticiperende rijstijl waarin sterke acceleraties en rijden bij te hoge snelheden worden vermeden en waarbij deceleraties zoveel mogelijk plaatsvinden door de wagen uit te laten rollen en te remmen op de motor in een hoge versnelling.

14.2.2 Welke emissiereductie is hiermee haalbaar?

Beide maatregelen behoren tot de categorie 'laaghangend fruit', in de zin dat in principe significante effecten kunnen worden bereikt tegen zeer lage investeringskosten. Kort na een cursus kan de besparing bij personenauto's 10% of meer zijn, maar TNO (2006a) verwacht dat deze daalt tot gemiddeld 3% een jaar of langer na de cursus. Hierover is nog onvoldoende bekend. In-car devices zoals een schakelindicator, een verbruiksmeter en cruise-control kunnen wel helpen om het potentieel beter te benutten.

TU Graz (2006) schat dat bij vrachtwagens met een energiezuinige rijstijl een verbruiksreductie van 5% haalbaar is. Een zelfde potentieel wordt genoemd in (ECN, 2007).

Rijden met correcte bandenspanning kan volgens TNO (2006a) bij personenauto's een besparing van gemiddeld 2 tot 3% opleveren. Tyre pressure monitoring systemen (zie paragraaf 9.3) kunnen daarbij helpen en maken de maatregel minder afhankelijk van menselijk gedrag, maar zijn alleen kosteneffectief bij hogere brandstofprijzen. Voor vrachtwagens geeft ECN (2007) een reductiepotentieel van 0,6% voor tyre pressure monitoring systemen.

14.2.3 Voor- en nadelen

Zuinig rijden en een correcte bandenspanning zijn moeilijk af te dwingen. Een ander belangrijk probleem met beide maatregelen betreft de 'measurability' en 'monitorability'. De CO₂-reductie die er in de praktijk mee bereikt wordt, is niet direct te meten. Monitoring zou in principe kunnen plaatsvinden door te bepalen hoeveel mensen een energiezuinige rijstijl toepassen en te verdisconteren met een gemiddeld jaarkilometrage en een gemiddelde reductiefactor. Deze factor is echter moeilijk te bepalen en hangt af van de initiële rijstijl en de mate waarin de rijstijltips - ook op lange termijn - optimaal worden opgevolgd.



14.2.4 Vermijdingskosten

De vermijdingskosten hangen af van het al dan niet volgen van lessen, de kosten van deze lessen, het aantal keren dat de lessen herhaald moeten worden, de kosten van overheidscampagnes om bestuurders te motiveren voor HNR en van de kosten van evt. gebruikte ondersteunende in-car devices (bijv. een schakelin-dicator). Informatie over Het Nieuwe Rijden en instructies voor het toepassen van een energiezuinige rijstijl zijn gratis toegankelijk via internet en andere communi-catiekanalen. Het correct toepassen van deze instructies is echter niet vanzelf-sprekend en eenvoudig en bovendien valt het niet te verwachten dat een groot deel van de bestuurders langs deze weg HNR zullen gaan toepassen en voor langere tijd correct zullen blijven toepassen.

De maatschappelijke vermijdingskosten zijn al vanaf een olieprijs van 25 €/bbl negatief (= netto besparing) indien bestuurders na het aanleren van HNR in de reguliere rij-opleiding of in eenmalige lessen de rijstijl voor altijd blijven toepassen op zo'n manier dat gemiddeld tenminste 3% besparing wordt bereikt (TNO, 2006a). Wanneer de lessen regelmatig worden herhaald kan de gemiddelde be-sparing hoger zijn maar nemen de kosten sterker toe, zodat de maatregel maat-schappelijk gezien positieve vermijdingskosten heeft (maar wel lager dan die van veel technische maatregelen).

Voor toepassing in vrachtwagens berekent TU Graz (2006) vermijdingskosten van -5 €/ton bij een olieprijs van 36 €/bbl.

14.2.5 Instrumenteerbaarheid

Voor de consument zijn genoemde maatregelen bijna altijd kosteneffectief. De problemen met 'measurability' en 'monitorability' maken voorsnog dat stimule-ring van HNR een interessante no-regret maatregel is, maar dat het opnemen van HNR in beleid gericht op het halen van kwantitatieve reductiedoelstellingen niet eenvoudig mogelijk is. HNR kan worden bevorderd door:

- het opnemen van HNR in de rijopleiding;
- het aanbieden van gerichte cursussen voor bestaande rijbewijsbezitters:
 - cursussen kunnen bijvoorbeeld worden aangeboden door fabrikanten bij aankoop van een nieuw voertuig of door leasemaatschappijen;
- overheidscampagnes.

Verhoging van de kosten van brandstof, a.g.v. accijnsverhoging of verrekening van de kosten van emissierechten in geval van een emissiehandelssysteem, verhoogt de baten voor de consument en zal dus ook een stimulerend effect hebben.

14.2.6 Synergie met andere gebieden

Een energiezuinige rijstijl leidt wel tot reductie van CO₂-emissies, maar niet tot lagere emissies van luchtverontreinigende stoffen. Bij incorrecte toepassing van de instructies is het bij personenauto's zelfs mogelijk dat de luchtverontreinigen-

de emissies toenemen. Het anticipatieve karakter van een energiezuinige rijstijl zou mogelijk wel de verkeersveiligheid ten goede kunnen komen.

14.3 Verkeersmaatregelen

Verkeersmaatregelen kunnen op verschillende manieren CO₂-emissies reduceren. Snelheidsverlaging en vooral vermindering van dynamiek verlagen de emissie per gereden kilometer. Daarnaast kan, met name in de gebouwde omgeving, bij verschillende vormen van verkeersbeleid (o.a. infrastructuur en parkeerbeleid) geprobeerd worden om het aantal gereden kilometers te reduceren. Daarbij kan het gaan om voorzieningen die autoverkeer voorkomen maar ook bijvoorbeeld om het vermijden van onnodige kilometers voor het zoeken van een parkeerplaats.

Rijdend bij constante snelheid neemt het brandstofverbruik van voertuigen meer dan lineair toe met de snelheid. Verlaging van de maximumsnelheid biedt dus een mogelijkheid om CO₂-emissies te reduceren. Reistijd is echter ook een economische factor dus deze maatregel is niet vanzelfsprekend kostenneutraal of kosteneffectief. Op drukke snelwegen kan echter verlaging van de maximumsnelheid (mits in combinatie met strenge handhaving) ook de doorstroming verbeteren. Wanneer constant 80 of 90 km/h wordt gereden is de wegcapaciteit groter dan bij een verkeersstroom met wisselende snelheden tot 120 km/h of meer. Dit vermindert ook het ontstaan van files. Bij het voor files kenmerkende stop-and-go verkeer zijn de CO₂-emissies per km als gevolg van de hoge dynamiek tot een factor 2,5 hoger dan bij normale doorstroming. Het voorkomen van files heeft dus ook een positief effect op CO₂-emissies. Daar staat tegenover dat verbeterde doorstroming ook verkeer aantrekt.

Optimalisatie van de verkeersdoorstroming op CO₂ of op een complexere set van doelen m.b.t. milieu en bijvoorbeeld veiligheid is mogelijk met geavanceerder verkeersmanagementsystemen. Dit valt onder de noemer ITS (Intelligent Transport Systems) en omvat verschillende componenten die momenteel in ontwikkeling zijn zoals: monitoring van verkeersstromen, in-car apparatuur, route- en reisplanners, interactie tussen voertuigen en interactie tussen voertuig en de weginfrastructuur. Voor het totale CO₂-reductiepotentieel van ITS-achtige maatregelen worden getallen in de orde van 10% genoemd.

Bovenstaande maatregelen kunnen ook helpen om ook de emissies van luchtverontreinigende componenten te verlagen. De toepassing van 80 km/h en trajectcontrole op de A13 bij Overschie laat echter wel zien dat de verkeerstechnische inpassing meer aandacht verdient om te voorkomen dat files zich naar andere delen van het traject verplaatsen. Landelijke opschaling van deze maatregel vereist derhalve lokaal maatwerk. Effecten op landelijke niveau zullen overigens beperkt zijn tot een of een paar procent omdat we weliswaar veel tijd in de file doorbrengen maar er niet veel kilometers in afleggen.

In de stad kan synchronisatie van verkeerslichten ('groene golf') de dynamiek van het verkeer sterk reduceren. Behalve een effect op lokale luchtverontreini-



ging vermindert dit ook de CO₂-emissies. Ook hier geldt dat de effecten op landelijke schaal waarschijnlijk beperkt zijn, maar verwacht mag worden dat de maatregel lagere vermijdingskosten heeft dan technische maatregelen als zuiniger voertuigen en biobrandstoffen.

Om de effecten van verkeersmaatregelen op CO₂-emissies zichtbaar te maken in landelijke statistieken moeten de effecten op de verkeersprestatie (aantal gereden kilometers) en op de emissies per gereden kilometer (emissiefactor) worden ingeschat. Met name dat laatste is niet triviaal. Moderne emissiefactorenmodellen als het VERSIT+ model (TNO, 2006b) zijn echter in staat om emissies te berekenen als functie van verkeersdynamiek. De verkeersdynamiek kan worden gemeten door op de weg ritpatronen te meten maar mogelijk kunnen op termijn ook verkeerskundige microsimulatiemodellen gebruikt worden. Verkeersmaatregelen voldoen dus in principe aan het criterium dat ze 'monitorable' zijn.

14.4 Volumereductie

Zoals reeds in het inleidende hoofdstuk aangegeven is het verkeersvolume een belangrijke determinant van de CO₂-emissies van de verkeerssector. In deel I van deze studie is beschreven dat voor de meeste vervoerwijzen voor de komende 40 jaar nog een flinke volumegroei wordt verwacht. Beheersing van deze groei is dus een voor de hand liggende maatregel om de CO₂-emissies van de verkeerssector op langere termijn te laten voldoen aan ambitieuze CO₂-reductiedoelstellingen. In hoofdstuk 17 wordt middels een back-of-the-envelope scenarioberekening verkend in hoeverre beheersing van volumegroei of zelfs volumereductie nodig is om de CO₂-emissies van verkeer in vervoer in Nederland in 2030 te reduceren tot 50% van de emissies in 2005.

Vanuit economisch perspectief is verhoging van de kosten van transport het belangrijkste middel om volume te beheersen of te reduceren. Autonome prijsstijgingen, bijvoorbeeld als gevolg van stijgende olieprijsen, hebben dus een volumereducerend effect. Hetzelfde geldt voor de netto meerkosten van toepassing van CO₂-reducerende technieken in respons op bijv. CO₂-emissienormen. Daarnaast kan gericht prijsbeleid worden ingezet om te sturen op volume. Dit kan middels bestaande belastingsystemen maar bijvoorbeeld ook door verschillende vormen van rekeningrijden.

Belangrijk bij volumebeleid is dat de gewenste respons van consumenten en vervoerders gefaciliteerd moet worden. Om consumenten en vervoerders minder CO₂ te laten emitteren moeten enerzijds energiezuinige voertuigen of alternatieven beschikbaar zijn en moet het anderzijds ook mogelijk zijn om verplaatsingsgedrag aan te passen. In het geval van consumenten betekent dit laatste dat het mogelijk moet zijn om bijvoorbeeld de gemiddelde afstand tussen wonen en werken te reduceren. Dit kan gefaciliteerd worden met ruimtelijke ordeningsbeleid en vestigingsbeleid voor industrie. Bij de inrichting van weginfrastructuur kan ook aandacht besteed worden aan het verminderen van 'omrijdkilometers'. Daarbij dient vanzelfsprekend wel een balans gevonden te worden met andere belangen rondom infrastructuur en ruimtelijke ordening.

Het goederenvervoer kan kilometers reduceren door bijvoorbeeld verhoging van de beladingsgraad en verbeterde logistiek. Daarbij kan verhoging van het toegestane voertuiggewicht of van de toegestane voertuiglengte, zoals genoemd in hoofdstuk 11, behulpzaam zijn. De meest voor de hand liggende reductie ligt echter in het dichterbij elkaar brengen van de locatie van productie en de locatie van consumptie van producten. Op dit moment is er een trend om productie te verplaatsen naar landen met lagere loonkosten. Een significante stijging van de vervoerskosten zal nodig zijn om deze trend te keren. Een stijging van de transportkosten zal vanzelf ook leiden tot een andere balans in de verhouding tussen transportkosten en voorraadkosten die in de huidige situatie leidt tot 'just-in-time' delivery en daaruit resulterende lagere beladingsgraden.



15 CO₂-reductie bij overige vervoerwijzen

15.1 Spoor

Dieseltreinen zijn verantwoordelijk voor slechts 0,5% van de EU-25 CO₂-emissies. Efficiencyverbetering voor deze voertuigen of opname in een emissie-handelsstelsel heeft dus niet de hoogste prioriteit. Wel zijn lokaal interessante voordelen te behalen, bijvoorbeeld door toepassing van hybride rangeerlocomotieven (TNO, 2006d). Voor elektrische treinen geldt dat emissiereducties deels bereikt worden door het feit dat elektriciteitsproductie al onderdeel is van het ETS (CE, 2006a). Moderne elektrische treinen zijn door toepassing van vermogens-elektronica en teruglevering van remenergie al veel efficiënter geworden. Dit effect wordt echter deels teniet gedaan door het toenemend gebruik van hogesnelheidstreinen.

15.2 Luchtvaart

15.2.1 Inleiding

Van alle luchtvaart in Nederland bestaat 98% uit internationale luchtvaart. Het aandeel van luchtvaart in de totale CO₂-emissie van Nederland is ca. 4,5% (op basis van kerosineverkoop in Nederland). Op EU-niveau is dat een kleine 3%. Kijken we alleen naar de transportsector dan is de luchtvaartbijdrage aan de broeikasgasemissies 12%. Eurocontrol voorspelt een jaarlijkse groei van het aantal vluchten in Europa van 3%. De groei in passagierkilometers zal naar verwachting hoger zijn, omdat de gereisde afstand ook toeneemt. Ondanks verwachte verbeteringen in brandstofefficiëntie van orde grootte 1 tot 2% per jaar, wordt voorzien dat de CO₂-emissies door de wereldwijde burgerluchtvaart in de periode 2002-2025 met zo'n 110% zal toenemen.

De Europese Commissie en de Europese Raad hebben aangegeven in principe voorstander te zijn van het onderbrengen van luchtvaart in het EU-emissie-handelssysteem. In december 2006 heeft de Commissie een voorstel voor de aanpassing van de emissiehandelrichtlijn gedaan dat opname van luchtvaart mogelijk maakt (COM(2006)818 final). Op die manier zou de netto klimaatschade van de luchtvaart beperkt kunnen worden, althans van het deel dat binnen het systeem wordt gebracht. Vanuit de luchtvaartindustrie is er veel nadruk op het verbeteren van de brandstofefficiëntie. De Europese luchtvaartindustrie heeft zich ten doel gesteld om m.b.v. efficiëntere vliegtuigen en motoren, betere air traffic management en alternatieve brandstoffen vliegen in 2020 50% efficiënter te laten zijn dan in 2000 (per passagierskilometer) (ACARE, 2002). Een andere maatregel, die momenteel wordt bekeken en (deels) al is uitgevoerd, is een belasting op kerosine. Nederland heft accijns op kerosine voor binnenlandse vluchten. Unilaterale uitbreiding van de accijnsheffing naar internationale vluchten is juridisch moeilijk en zou negatieve effecten kunnen hebben voor de concurrentiepositie van de Nederlandse luchtvaart.

Het is belangrijk om ook de niet CO₂-gerelateerde impact op klimaatverandering door luchtvaart mee te nemen. Dit zijn deels verwarmende effecten, deels afkoelende effecten, zoals atmosferisch-chemische reacties op basis van NO_x die de ozonconcentratie in de atmosfeer verhogen (verwarmend) en methaan afbreken (afkoelend), roetdeeltjes uit vliegtuigmotoren (verwarmend), zwavel-aerosolen (afkoelend) en vorming van condensstrepen (overdag afkoelend maar 's nachts verwarmend) en mogelijk ook cirruswolken. IPCC (1999) schatte de totale impact van luchtvaart (exclusief effect door het ontstaan van cirruswolken) 2 tot 4 maal groter dan de impact van CO₂ alleen. Recenter onderzoek wijst op een factor 2 (Sausen, 2005).

15.2.2 Categorisering van maatregelen

Het klimaateffect van luchtvaart kan met tal van maatregelen beperkt worden. Deze paragraaf maakt onderscheid tussen maatregelen bij nieuwe vliegtuigen enerzijds en maatregelen bij bestaande vliegtuigen anderzijds. Vanwege de lange levensduur van vliegtuigen - zo'n 25 tot 35 jaar - hebben maatregelen bij nieuwe vliegtuigen pas op een wat langere termijn effect. Bij bestaande vliegtuigen wordt onderscheid gemaakt tussen operationele en technische maatregelen, en tussen maatregelen die door luchtvaartmaatschappijen kunnen worden genomen, door luchthavens, en door luchtverkeersleiding. Tabel 22 geeft een overzicht van de maatregelen en reductiepotentiëlen.

Nieuwe vliegtuigen zijn doorgaans efficiënter dan bestaande vliegtuigen, vanwege de voortdurende nadruk die de kopers van vliegtuigen leggen op brandstofverbruik. De verbetering van de efficiëntie wordt bereikt door een groot aantal maatregelen, die elk een kleine bijdrage hebben: efficiëntere motoren, lichtere materialen, betere aërodynamische eigenschappen, enzovoort. De verbetering wordt vaak geschat op 1% per jaar, maar het is mogelijk dat de snelheid van de verbetering afneemt (Peeters, 2005).

Een uitzondering op deze ontwikkeling was de introductie van straalmotoren, die aanzienlijk minder efficiënt waren dan de propellermotoren die ze vervingen (Peeters, 2005). Ze hadden echter andere voordelen waardoor ze toch aantrekkelijk waren voor luchtvaartmaatschappijen, zoals hogere snelheden en minder lawaai²¹. Inmiddels zijn er nieuwe typen propellermotoren ontwikkeld die weliswaar nog steeds iets meer geluid maken dan straalmotoren, maar wel binnen de internationale normen blijven (bijvoorbeeld de General Electric GE-36 UDF). Deze motoren zijn 20% - 30% efficiënter dan vergelijkbare straalmotoren (Lee, 2001).

Nieuwe vliegtuigen zijn efficiënter door het gebruik van lichtere materialen, en een betere aerodynamica. Deze ontwikkelingen zijn nog niet ten einde (Greener by Design, 2005). Ook toekomstige vliegtuigen zullen daarom efficiënter zijn. In sommige gevallen wordt de vooruitgang echter belemmerd door lock-in effecten: de Airbus A380, bijvoorbeeld, heeft suboptimale vleugels omdat een vliegtuig van

²¹ Dan propellormotoren van het "unducted fan" type.



deze afmetingen met optimale vleugels op verschillende luchthavens niet zou worden toegelaten (Norris and Wagner, 2005).

Wanneer geheel nieuwe vliegtuigconcepten doorbreken in de burgerluchtvaart, zoals bijvoorbeeld de zgn. *Blended Wing*, kan zelfs een aanzienlijke verbetering van de brandstofefficiëntie worden bereikt. Een Blended Wing is een 'vliegende vleugel', een vliegtuig waar de romp een geheel vormt met de vleugels. Een blended wing kan aanzienlijk zuiniger zijn dan een traditioneel verkeersvliegtuig. Hoe groot deze verbetering precies zal zijn, is moeilijk te voorspellen (IPCC, 1999).

Bestaande vliegtuigen kunnen op bepaalde punten aangepast worden om de efficiëntie te verhogen. Bekende maatregelen zijn *winglets*, opstaande vleugeltjes aan het uiteinde van de vleugels, die de brandstofefficiëntie met 2% - 6% kunnen verhogen, afhankelijk van de gemiddelde lengte van de vlucht, en *riblets*, onefenheden in de lak die de onderdruk achter het vliegtuig verminderen en de brandstofefficiëntie met 1% - 2% kunnen verbeteren (Hagler Baily, 2000).

Luchthavens kunnen stroom aanbieden aan de gates, waardoor vliegtuigen hun hulpmotoren op luchthavens kunnen uitschakelen (SSSM, 2000). Het slepen van vliegtuigen naar de startbaan kan ook de CO₂-uitstoot verminderen (ICAO, 2003).

De belangrijkste verbeteringen voor **bestaande vliegtuigen** kunnen echter op **operationeel** gebied worden gevonden. Sommige maatregelen kunnen door luchtvaartmaatschappijen worden genomen, andere maatregelen liggen op het vlak van de luchtverkeersleiding. Luchtvaartmaatschappijen kunnen het volgende doen:

- Een betere training van de bemanning kan een besparing van 1-2% opleveren (IATA, 2004);
- Minder tankering: vliegtuigen nemen soms brandstof aan boord voor meerdere vluchten om te profiteren van lage kerosineprijzen op bepaalde luchthavens of om de verblijftijd op luchthavens te minimaliseren (ICAO, 2003). Het vervoeren van de extra brandstof kost brandstof. Minder tankering kan tot 0,75% brandstof (en daardoor CO₂) besparen (Frontier, 2006).
- Beter onderhoud kan de aerodynamische achteruitgang van vliegtuigen tegengaan. Het gaat dan om het repareren van niet precies sluitende deuren, van beschadigingen van het oppervlak waar het glad behoort te zijn, het vaker reviseren van motoren enzovoort (ICAO, 2003).

De luchtverkeersleiding kan maatregelen nemen die ervoor zorgen dat vliegtuigen minder omvliegen. Momenteel gebeurt dat veelvuldig, onder meer doordat grote delen van het luchtruim niet toegankelijk zijn voor commerciële luchtvaart en doordat in verschillende delen van het luchtruim verschillende regimes gelden. Verbeteringen kunnen bestaan uit:

- het brengen van de gehele vlucht onder een enkel regime;
- openstellen van grotere delen van het luchtruim voor commerciële luchtvaart;
- vermindering van de verticale afstand tussen vliegtuigen, waardoor meer vliegtuigen op hun optimale hoogte kunnen vliegen.

Vermindering van de verticale separatie-afstand draagt niet alleen bij aan CO₂-reductie door vliegen op optimale hoogte, maar vergroot ook de capaciteit op bestaande routes. Gezien de huidige groei van de luchtvaart lijkt capaciteit echter nog geen beperkende factor zodat verondersteld mag worden dat evt. rebound effecten van vermindering van de verticale separatie-afstand beperkt zijn.

Veel van deze maatregelen worden momenteel bestudeerd, voorbereid of zelfs al ingevoerd. Al deze maatregelen samen zouden CO₂-emissies met 8% tot 10% kunnen terugbrengen (Frontier, 2006; ICAO, 2003).

Tabel 22 Maatregelen om kooldioxide-emissies van luchtvaart te verminderen

Actor	Categorie	Maatregel	CO ₂ -besparing (NB niet sommeerbaar)
Vliegtuigbouwers	Nieuwe vliegtuigen	Efficiëntieverbetering algemeen	0-1% per jaar
		Propellermotoren	20% - 30%
		Blended wing concept	p.m.
	Bestaande vliegtuigen	Winglets	2-6%
		Riblets	1-2%
Luchtvaartmaatschappijen	Operationeel	Training bemanning	1-2%
		Minder tankering	0-0,75%
		Beter onderhoud	p.m.
Luchthavens	Operationeel	Stroom aan Gates	p.m.
		Vliegtuigen slepen	p.m.
Luchtverkeersleiding	Operationeel	Openen luchtruim	8-10%
		Eén regime voor elke vlucht	
		Vermindering verticale afstand	

Bronnen: Zie tekst.

In bovenstaande tabel worden **biobrandstoffen** niet genoemd. Biobrandstoffen zijn in principe wel een optie voor CO₂-reductie in de luchtvaart, maar de praktische toepasbaarheid is nog onvoldoende onderzocht. In de luchtvaart worden hoge kwaliteitseisen aan de brandstof gesteld: het vriespunt moet laag genoeg zijn om op grote hoogte vloeibaar te blijven, de energie-inhoud moet hoog genoeg zijn om de brandstof mee te kunnen nemen, de kwaliteit moet consistent zijn om de motoren goed te laten functioneren, enzovoort. Om die reden zijn de huidige beschikbare biobrandstoffen niet geschikt voor de luchtvaart (afgezien van enkele niche-toepassingen, zoals sproeivliegtuigen in tropische landen, die nu al regelmatig biobrandstoffen gebruiken, maar geen last hebben van lage temperaturen). In de toekomst zal het zeker mogelijk zijn om biomass-to-liquid brandstoffen te maken die voldoen aan de kwaliteitseisen van de luchtvaart-brandstoffen. Nu zijn de kosten van dergelijke brandstoffen echter nog prohibitief. Maar ook als de productie van deze brandstoffen verder uitontwikkeld is en goedkoper is geworden valt te verwachten dat biomass-to-liquid brandstoffen voor de luchtvaart alleen aantrekkelijk zijn bij erg lage biomassaprijzen of erg hoge CO₂-prijzen.



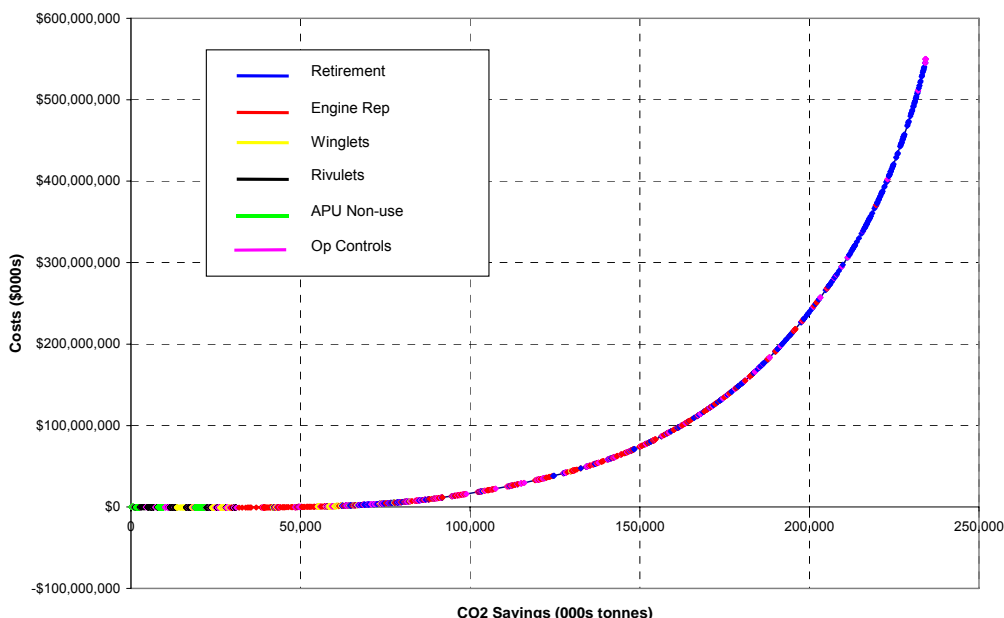
15.2.3 Kosten van maatregelen

Er zijn geen recente betrouwbare kostenschattingen van emissiereductie in de luchtvaart in Europa. Een belangrijke reden daarvoor is dat het moeilijk is om betrouwbare kostenschattingen te vinden vanwege het geconcentreerde karakter van de vliegtuigindustrie. De enige omvattende studie naar de kosten van maatregelen in de luchtvaart is in 2000 uitgevoerd door Stratus Consulting en Hagler Bailly (SSSM, 2000; Hagler Bailey, 2000). Deze studie is uitgevoerd voor de *Forecast and Economics Sub Group* (FESG) van de *Committee in Environmental Protection* (CAEP) van de *International Civil Aviation Organization* (ICAO). De FESG heeft de studie besproken, maar hij is verder niet onderworpen aan kritiek.

De studie gaat uit van de situatie in de wereldwijde luchtvaart in 1998 en een kerosineprijs van US\$ 0,63 per gallon. In januari 2007 lag de prijs op US\$ 1,697 per gallon (Platts, 2007). Dit is 170% hoger. Door de hogere brandstofprijs zijn de baten van emissiereductie hoger en daardoor zijn de kosten lager. Dit betekent dat een aantal maatregelen al genomen zijn door luchtvaartmaatschappijen.

Door hogere brandstofprijzen schuift de kostencurve naar rechts (lagere gemiddelde en marginale kosten), maar omdat een aantal maatregelen reeds genomen is, schuift de kostencurve weer terug naar links (hogere kosten). Het is niet goed te voorspellen hoe de huidige kostencurve eruit zou zien, onder invloed van deze twee tegengesteld werkende factoren. Bovendien is de curve uitsluitend gebaseerd op de kosten van maatregelen binnen de sector. Eventuele prijsverhogingen en veranderingen van de vraag zijn in de berekeningen niet meegenomen.

Figuur 84 Kostencurve voor CO₂-emissiereductie in de luchtvaart



Bron: SSSM, 2000.

N.B.: De huidige kostencurve ligt anders. Zie tekst.

Figuur 84 laat de kostencurve van SSSM zien voor 2010. Volgens het achtergrondscenario waar (SSSM 2000) van uitgaat zou de luchtvaart in dat jaar 700.000 ton CO₂ emitteren. Een reductie van 100.000 ton komt dus overeen met een reductie van ongeveer 14%.

15.3 Opties voor klimaatbeleid voor luchtvaart

Klimaatbeleid voor luchtvaart bestaat tenminste uit drie onderdelen: het moet duidelijk zijn welke partij(en) verantwoordelijk is (zijn) voor luchtvaartemissies (geheel of gedeeltelijk); die partijen moeten beleidsinstrumenten hebben om de emissies te beheersen en een klimaatdoelstelling voor luchtvaart (of een bredere doelstelling waar luchtvaart onderdeel van is).

Deze paragraaf verkent de opties voor klimaatbeleid voor de luchtvaart op basis van de bestaande literatuur.

Beleid om klimaateffecten van luchtvaart te beperken dient rekening te houden met het internationale karakter van luchtvaart. Unilateraal beleid van een klein land als Nederland heeft weinig effect, omdat veel van de milieuwinst die in Nederland zou worden geboekt teniet zou worden gedaan door extra groei van de luchtvaart in omliggende landen. Klimaatbeleid voor de luchtvaart kan daarom het best in internationaal verband genomen worden. In de beleidsdiscussie wordt aan drie globale oplossingsrichtingen gedacht (CE, 2006f):

- toedeling van luchtvaartemissies aan landen;
- klimaatdoelstellingen van de luchtvaartsector zelf;
- regionaal klimaatbeleid.

Op elk van deze oplossingsrichtingen zal hier kort worden ingegaan.

15.3.1 Toedeling van luchtvaartemissies aan landen

Deze oplossingsrichting is gebaseerd op de architectuur van het Kyoto Protocol: landen krijgen een plafond opgelegd van emissies. Op dit moment vallen de emissies van internationale luchtvaart en zeevaart buiten de nationale doelstellingen, maar er zijn verschillende verdeelsleutels om die emissies daarin onder te brengen. In UNFCCC-verband zijn acht verdeelsleutels ('allocatieopties') bestudeerd (CE, 2004):

- 1 Geen toedeling.
- 2 Toedeling van wereldwijde verkopen van bunkerbrandstoffen in overeenstemming met de nationale emissies van landen.
- 3 Toedeling aan landen waar brandstoffen worden verkocht.
- 4 Toedeling op basis van de nationaliteit van het transportbedrijf, of toedeling aan het land waar een vliegtuig is geregistreerd, of waar de operator van het vliegtuig is gevestigd.
- 5 Toedeling aan het land van vertrek of aankomst van een schip, of gedeeltelijke toedeling aan het land van vertrek en gedeeltelijke toedeling aan het land van vertrek.



- 6 Toedeling aan het land van vertrek of aankomst van passagiers of lading, of gedeeltelijke toedeling aan het land van vertrek en gedeeltelijke toedeling aan het land van vertrek.
- 7 Toedeling aan het land van oorsprong van passagiers of toedeling aan het land van vestiging van de eigenaar van de lading.
- 8 Toedeling aan het land in wiens gebied de uitstoot plaatsvindt.

Om verschillende redenen heeft de UNFCCC besloten dat de opties 2, 7 en 8 belangrijke nadelen hebben en daarom bij verdere studie buiten beschouwing kunnen worden gelaten. Optie 7, bijvoorbeeld, vereist zeer intensieve dataverzameling en -bewerking, en optie 8 deelt emissies toe aan landen waar vliegtuigen overvliegen, zonder dat die landen beleidsinstrumenten hebben om die emissies te reduceren. Ook optie 6 zou veel dataverzameling en -bewerking vereisen.

Bij de toedeling van emissies aan landen moet rekening worden gehouden met het uitgangspunt van de UNFCCC dat landen *gemeenschappelijke maar verschillende verantwoordelijkheden* hebben ('common but differentiated responsibilities'). Dit impliceert dat ontwikkelingslanden geen emissieplafonds hebben (zoals onder het Kyoto Protocol) of minder strenge emissieplafonds (zoals onder verschillende voorstellen voor post-2012 klimaatbeleid, zoals de Multi Stage Approach of Contraction and Convergence). Als landen zouden besluiten om hun luchtvaart even streng te behandelen als de rest van hun emissies, zou een toedeling onder optie 4 leiden tot een verstoring van de markt. Op routes waar luchtvaartmaatschappijen uit geïndustrialiseerde landen concurreren met luchtvaartmaatschappijen uit ontwikkelingslanden zou de concurrentiepositie van de laatste verbeteren ten koste van de eerste. Deze verstoring van de markt maakt de optie politiek lastiger te bereiken en doet bovendien afbreuk aan de effectiviteit: als op de hier aangehaalde routes de luchtvaartmaatschappijen uit geïndustrialiseerde landen marktaandeel verliezen aan maatschappijen uit ontwikkelingslanden, terwijl de omvang van de markt zich op dezelfde manier ontwikkelt, is er per saldo geen afname van emissies.

Op grond van deze overwegingen concludeert CE (CE, 2006f) dat voor de luchtvaart alleen opties 1, 3, en 5 (respectievelijk geen toedeling, toedeling op basis van brandstofverkoop en toedeling op basis van routes van vliegtuigen) de basis kunnen vormen van effectief klimaatbeleid.

Vanwege het internationale karakter van de luchtvaart verdient het aanbeveling om de beleidsinstrumenten in verschillende landen op elkaar af te stemmen. CE stelt voor om te werken met gedifferentieerde beleidsinstrumenten met een gemeenschappelijke basis (CE, 2006f). Bijvoorbeeld, midden-inkomen landen zouden emissieheffingen kunnen invoeren voor alle vertrekkende vluchten, en geïndustrialiseerde landen een emissiehandelssysteem. De berekening van de emissies zou in beide systemen op elkaar afgestemd dienen te zijn, en de heffing zou onder de prijs van het handelssysteem liggen.

Wanneer luchtvaartemissies zouden worden toebedeeld aan landen, zouden er geen aparte doelstellingen komen voor de luchtvaartsector. Landen krijgen in dit geval de vrijheid om de lasten van emissiereductie te verdelen over verschillende sectoren.

15.4 Klimaatdoelstellingen van de luchtvaartsector zelf

De eerste allocatieoptie van de lijst hierboven is 'geen allocatie'. Daarmee wordt bedoeld dat de emissies van luchtvaart niet worden toebedeeld aan landen, maar dat de sectoren zelf verantwoordelijkheid nemen voor het terugdringen van het klimaatteffect. In de praktijk zou dit bijvoorbeeld kunnen betekenen dat ICAO, de internationale organisatie die de commerciële luchtvaart reguleert, een doelstelling op zich neemt om de emissies van luchtvaart langs een bepaald tijdpad te reduceren. ICAO stemt dit tijdpad af met de UNFCCC en beide organisaties erkennen elkaars emissie-eenheden. Daardoor wordt het mogelijk dat ICAO een emissiehandelssysteem opzet voor de luchtvaart dat verbonden is met emissiehandelssystemen in het kader van de UNFCCC, zoals het EU ETS.

Op dit moment hebben Annex I landen zich onder het Kyoto-protocol verbonden aan het reduceren van emissies van de luchtvaart binnen ICAO-verband. Hiermee is echter nauwelijks voortgang bereikt. Een van de redenen daarvoor is dat ontwikkelingslanden betogen dat hun luchtvaart uitgesloten moet worden van maatregelen, omdat zij onder Kyoto immers geen klimaatdoelstelling hebben.

Hoewel het goed denkbaar is dat ontwikkelingslanden in een toekomstig klimaatbeleid wel een klimaatdoelstelling krijgen, is het vastgelegd in de UNFCCC dat die doelstelling anders zal zijn dan de doelstelling van geïndustrialiseerde landen. Om uit de huidige patstelling te komen is het daarom ook onder een sectorale benadering nodig om beleid te differentiëren.

CE (2007) suggereert dat wellicht een gedifferentieerde vorm van emissiehandel hiervoor geschikt zou kunnen zijn: op routes vanuit geïndustrialiseerde landen zouden luchtvaartmaatschappijen verplicht kunnen worden om emissierechten in te leveren voor al hun emissies, terwijl op routes vanuit ontwikkelingslanden slechts voor de helft van de emissies rechten zouden hoeven te worden ingeleverd.

Naast het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen zou ICAO ook initiatieven kunnen ontplooiën om niet-CO₂-klimaatteffecten terug te dringen. Bijvoorbeeld door het stellen van verdergaande NO_x-normen voor vliegtuigmotoren en door het uitwerken van procedures om het optreden van condensatiestrepen tegen te gaan.

15.4.1 Regionaal klimaatbeleid

Regionaal klimaatbeleid voor bijvoorbeeld de luchtvaart heeft als voordeel dat er geen internationale overeenstemming voor nodig is. Daar staat tegenover dat het effect beperkter is omdat per definitie veel emissies buiten de reikwijdte van regi-



onaal beleid vallen. Bovendien kan unilateraal regionaal beleid weerstanden oproepen bij landen die niet bij het beleid betrokken zijn, maar wier luchtvaartmaatschappijen wel door het beleid geraakt worden.

Het is niet wenselijk en misschien ook niet mogelijk om buitenlandse luchtvaartmaatschappijen uit te sluiten van regionaal beleid. Niet wenselijk, omdat het de markt ernstig zou verstoren. Niet mogelijk, omdat de Conventie van Chicago, die de burgerluchtvaart regelt, voorschrijft dat landen regels voor de luchtvaart non-discriminatoire toepassen, dus zonder onderscheid te maken naar de nationaliteit van een luchtvaartmaatschappij.

Binnen de EU ligt een voorstel van de Europese Commissie op tafel voor regionaal klimaatbeleid voor luchtvaart (COM(2006)818 final). Dit voorstel behelst dat met ingang van 2012 luchtvaart wordt ondergebracht in het Europese Emissiehandelssysteem (ETS). Luchtvaartmaatschappijen zouden voor alle emissies op vluchten van en naar EU-luchthavens emissierechten moeten inleveren. Zij verkrijgen emissierechten deels gratis, en deels door deelname aan een veiling. Een eventueel tekort aan emissierechten kunnen ze dekken door rechten aan te kopen in het ETS of door rechten aan te kopen van de Kyoto flexibele mechanismen CDM en JI.

15.5 Scheepvaart

15.5.1 Inleiding

Scheepvaart is gemeten in tonnen vracht de grootste transportmodus in de EU. De zeescheepvaart heeft hierin een veel groter aandeel dan de binnenvaart. In het algemeen is scheepvaart een energie-efficiëntere vorm van transport dan transport via weg, spoor en lucht (in MJ/tonkm). Door groei van de sector is de scheepvaartbijdrage aan wereldwijde emissies echter significant en groeiend. Zee- en binnenvaart veroorzaken 14% van de broeikasgasemissies van alle transport in Europa.

Broeikasgasemissies van internationale zeevaart worden momenteel niet toegerekend aan individuele landen. Dit feit en het feit dat de zeevaart een internationaal en vaak mondiaal opererende sector is, zijn een barrière voor de implementatie van milieubeleid. Er is geen internationaal, regionaal of nationaal beleid om emissies van de zeescheepvaart te beperken, al wordt er door verschillende EU-lidstaten en door bijvoorbeeld Noorwegen wel aangedrongen op maatregelen. Technisch en operationeel zijn er mogelijkheden om de brandstofefficiëntie van schepen te verbeteren, maar er is weinig zicht op de kosteneffectiviteit van de maatregelen.

15.5.2 Categorisering van maatregelen

Er is een groot aantal maatregelen waarmee de broeikasgasemissies van zeeschepen kan worden beperkt. In de meeste gevallen betekent emissiebeperking een verbetering van de brandstofefficiëntie.

Maatregelen kunnen op verschillende manieren gecategoriseerd worden. Deze paragraaf maakt onderscheid tussen de verbetering van de efficiëntie van bestaande schepen en van nieuwe schepen. Bovendien wordt voor bestaande schepen onderscheid gemaakt tussen maatregelen aan het schip (technische maatregelen) en maatregelen in het scheepsgebruik (operationele maatregelen). Bij **nieuwe schepen** kan het ontwerp geoptimaliseerd worden op brandstofefficiëntie. Dit is niet vanzelfsprekend een van de belangrijkste ontwerpcriteria, omdat bijvoorbeeld smalle (en daardoor efficiënte) schepen meer staal vereisen dan brede (en daardoor minder efficiënte). Wanneer de olieprijs laag is en de staalprijs hoog kan het rationeel zijn om te kiezen voor een minder brandstofefficiënt schip. Figuur 85 laat zien dat tussen 1965 en 1985 de efficiëntie van nieuwe scheepsrompen verbeterde (lagere ϵ_H), maar dat deze trend zich omkeerde toen de olieprijsen in de jaren 1980 zakten.

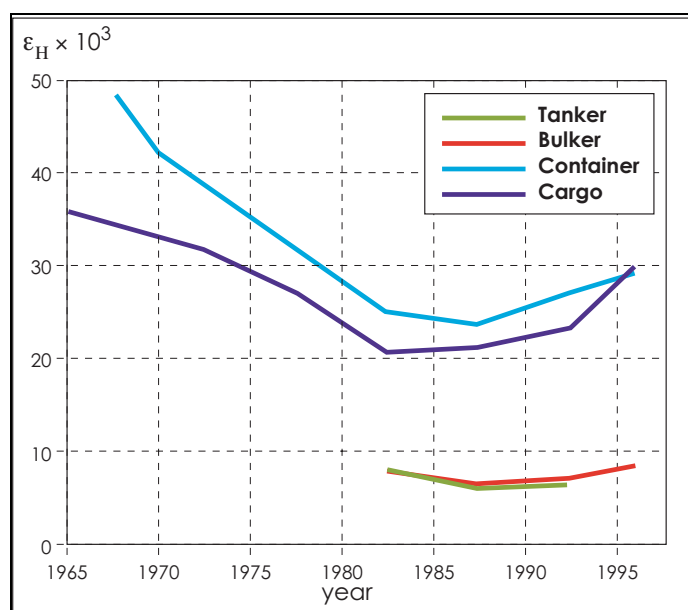
In de voortstuwing van **nieuwe schepen** is winst te halen uit verhogen van de efficiëntie van de schroeven en uit diesel-elektrische systemen, waarbij een dieselmotor die constant op optimaal toerental draait een generator aandrijft, die op zijn beurt elektromotoren bij de schroef aandrijft.

Bij **bestaande schepen** kan een aantal **technische maatregelen** genomen worden die elk een beperkt effect hebben op de emissies, maar gezamenlijk de emissies met een aantal procenten kunnen terugbrengen. Optimaal romponderhoud, bijvoorbeeld, vermindert de waterweerstand en kan het brandstofverbruik met 3% tot 6% terugdringen. Kleine aanpassingen aan de romp, zoals achterstevenflappen of boegvinnen, kunnen de waterweerstand ook met enkele procenten verlagen. Een meer ingrijpende verandering (voor de meeste schepen) is een elektronische regeling van brandstofverbruik en directe injectie, waarmee het verbruik met 3-6% kan worden verminderd.

Operationele maatregelen op **bestaande schepen** hebben waarschijnlijk het hoogste reductiepotentieel. Er zijn enkele maatregelen die flinke reducties kunnen bewerkstelligen, zoals het verlagen van de vaarsnelheid en het verbeteren van de logistiek. Daarnaast zijn er tal van kleine maatregelen die elk een procent of minder brandstof besparen, maar gezamenlijk een aanzienlijke reductie kunnen bewerkstelligen. Er zijn voorbeelden van bedrijven die hun bemanningen hebben getraind om brandstofefficiënt te varen en daardoor 10% minder brandstof verbruikten (DNV, 2006). Sommige operationele maatregelen vereisen de samenwerking tussen verschillende actoren en zijn daardoor moeilijker te implementeren dan maatregelen die bijvoorbeeld reders eenzijdig kunnen nemen.



Figuur 85 De efficiëntie van scheeprompen nam af toen de olieprijs zakte



Bron: Ship and Ocean Foundation, 2000: A report on research concerning the reduction of CO₂ emissions from vessels, Tokyo.

Tabel 23 geeft een overzicht van de maatregelen en reductiepotentiëlen. De reductiepotentiëlen zijn per maatregel gegeven. Ze zijn niet zonder meer te sommeren. Effecten van bepaalde maatregelen kunnen effecten van andere maatregelen verminderen en bovendien kunnen maatregelen elkaar overlappen of sluiten ze andere maatregelen uit.

In Tabel 23 worden **biobrandstoffen** niet expliciet genoemd. In principe zijn biobrandstoffen echter wel inzetbaar in de scheepvaart. Dit zouden goedkopere biobrandstoffen kunnen zijn dan die voor wegtransport, omdat scheepsmotoren minder hoge eisen stellen aan de brandstofkwaliteit. Mogelijk zijn zelfs vormen van 'bio-crude' in te zetten. De zeevaart stookt nu echter hoofdzakelijk laagwaardige zware stookolie. Dit is in feite een afvalproduct van de raffinage. Het is niet te voorzien dat op korte tot middellange termijn biobrandstoffen zullen kunnen concurreren met deze brandstof.

15.5.3 Kosten van maatregelen

Voor de meeste maatregelen uit Tabel 23 is het niet mogelijk om een kosten-schatting te geven bij gebrek aan goede studies hierover. Daarom wordt hier volstaan met een grove inschatting van de kosteneffectiviteit.

Een aantal maatregelen is bijna altijd rendabel. Hiertoe behoren veel operationele maatregelen maar ook technische aanpassingen van schepen zoals achterstevensflappen en boegvinnen.

Andere maatregelen zijn rendabel bij hoge olieprijsen, zoals investeringen in schepen met een betere rompvorm, of investeren in beter onderhoud.

Weer andere maatregelen kunnen alleen geïmplementeerd worden in samenwerking tussen verschillende actoren. Denk bijvoorbeeld aan sneller laden of lossen of een verbetering van de communicatie met de havens.

Tabel 23 Maatregelen om kooldioxide-emissies van scheepvaart te verminderen

Actor	Categorie	Maatregel	CO ₂ besparing (NB niet sommeerbaar)
Scheepsbouw, nieuwe schepen	Rompontwerp	Verminderen waterweerstand	5-20% (1) 5-10% (3)
		Verminderen windweerstand	p.m.
		Achterstevenflappen	1-3% (3)
		Boegvinnen	p.m. (3)
	Voortstuwing	Verhogen efficiëntie motoren	4-6% (1)
		Verhogen efficiëntie overbrenging	<2% (5)
		Verhogen efficiëntie schroef	5-10% (1)
		Motormanagement	0,5-1% (1)
		Verbeterde gasturbine	20-30% (3)
		Volledig elektrisch schip	15-19% (3)
		Diesel-elektrische voortstuwing met counter-rotating schroeven	-20% (5)
Overig energiegebruik		Boilers Walstroom	p.m. p.m.
Alternatieve brandstoffen	HFO naar MDO	4-5% (1)	
Reder, bestaande schepen	Onderhoud	Optimaal romponderhoud	3-5% (1)
		Optimaal schroefonderhoud	1-3% (1)
		Anti-fouling coatings	6% (3)
		Zelf polijstende coatings	5% (3)
	Aanpassingen aandrijfsysteem	Brandstofinjectie	1-2% (1)
		Efficiency rating	3-5% (1)
	Aanpassen romp	Achterstevenflappen	1-3% (3)
		Boegvinnen	p.m. (3)
	Alternatieve brandstof	HFO naar MDO	4-5% (1)
	Reder, operationeel	Verbeteren logistiek	Vlootplanning
'just in time' routing			1-5% (1)
Weather routing			2-4% (1)
Verlagen vaarsnelheid			0-50% (2)
Verbeteren operationele techniek		Minimale ballast	0-1% (1)
		Optimale stabiliteit	0-1% (1)
		Optimaal sturen	0-0,3% (1)
		Optimale schroefsnellheid	0-2% (1)
		Optimale vermogen	0 – 65% (3)
		Optimaal brandstofverbruik	0-10% (4)
Infrastructuur	Logistiek	Verbeteren communicatie met havens	p.m. (2)
		Laden en lossen	1-5% (1)
		Optimaal aanleggen en wegvaren	1-2% (1)

Noot: ¹⁾MARINTEK, 2000; ²⁾CE, Delft 2006; ³⁾Defence Science Board, 2001; ⁴⁾DNV, 2006; ⁵⁾ABB, 2005.



15.6 Opties voor klimaatbeleid voor zeevaart

Vandaag de dag is zeescheepvaart niet ondergebracht in het internationale klimaatbeleid. Onder meer vanwege de moeilijkheid om te beslissen over de toedeling van emissies is in 1997 besloten om internationale scheepvaart, net als internationale luchtvaart, niet onder te brengen in de emissiereductiedoelstellingen van het Kyoto Protocol. Wel hebben zogenaamde 'Annex I landen' de taak op zich genomen om te streven naar het terugbrengen van de emissies van internationale scheepvaart, waarbij ze gebruik zouden maken van de IMO. Deze inspanningsverplichting heeft tot op heden weinig concrete resultaten opgeleverd en heeft niet geresulteerd in de implementatie van beleid om uitstoot van broeikasgassen in de internationale scheepvaart te beheersen.

Momenteel vinden er in verschillende verbanden discussies plaats over klimaatbeleid na 2012. Een van de onderwerpen waarover gesproken wordt is het onderbrengen van internationaal transport (luchtvaart en zeevaart) in mondiale afspraken over de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen. Het is dan ook mogelijk dat scheepvaart na 2012 ondergebracht zal zijn in internationaal klimaatbeleid.

Bovendien heeft de EU aangegeven de mogelijkheid te overwegen om unilateraal beleid te ontwikkelen en implementeren om de klimaateffecten van zeescheepvaart te verminderen, wanneer concrete en ambitieuze afspraken binnen IMO-kader niet mogelijk blijken te zijn.

Het onderbrengen van internationale scheepvaart in het klimaatbeleid - mondiaal of Europees - kan op verschillende manieren gebeuren. Dit hoofdstuk analyseert hoe internationale scheepvaart ondergebracht zou kunnen worden in klimaatbeleid. Het geeft een overzicht van de belangrijkste internationale en Europese beleidsopties met betrekking tot broeikasgasemissies van de internationale scheepvaart. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds beleidsopties in het kader van een wereldwijd klimaatbeleid, en anderzijds beleidsopties in het kader van een eventueel Europees initiatief om de uitstoot van broeikasgassen van de zeescheepvaart te beperken. Belangrijke bronnen voor het identificeren van opties zijn recente CE Delft-rapporten (2006a, 2006b).

Deze paragraaf is als volgt opgebouwd. De paragrafen 15.6.1 tot en met 15.6.4 analyseren de belangrijkste beleidsopties om zeevaart onder te brengen in een wereldwijd klimaatbeleid. De paragrafen 15.6.5 tot en met 15.6.8 brengen de mogelijkheden in kaart die Europa heeft om unilateraal klimaatbeleid voor zeevaart te voeren. Paragraaf 15.7, ten slotte, besteedt kort aandacht aan de binnenvaart.

15.6.1 Beleidsopties in het kader van een wereldwijd klimaatbeleid

Beleidsopties om de uitstoot van broeikasgassen in de zeescheepvaart te beperken bestaan uit drie aspecten:

- a Een manier om de emissies toe te delen aan landen.
- b Beleidsinstrumenten om de toebedeelde emissies te beheersen.

- c De manier waarop de toebedeelde emissies doorwerken in de nationale doelstellingen²².

De drie aspecten zijn onderling verbonden. Hieronder worden ze eerst afzonderlijk besproken, waarna er kort iets wordt opgemerkt over de relatie tussen de drie.

ad a Toedeling emissies

Broeikasgasemissies van zeescheepvaart kunnen op verschillende manieren aan landen worden toebedeeld. In 1996 heeft de SBSTA acht opties opgesteld voor de toedeling aan landen:

- 1 Geen toedeling.
- 2 Toedeling van wereldwijde verkopen van bunkerbrandstoffen in overeenstemming met de nationale emissies van landen.
- 3 Toedeling aan landen waar brandstoffen worden verkocht.
- 4 Toedeling op basis van de nationaliteit van het transportbedrijf, of toedeling aan het land waar een schip is geregistreerd, of waar de operator van het schip is gevestigd.
- 5 Toedeling aan het land van vertrek of aankomst van een schip, of gedeeltelijke toedeling aan het land van vertrek en gedeeltelijke toedeling aan het land van vertrek.
- 6 Toedeling aan het land van vertrek of aankomst van passagiers of lading, of gedeeltelijke toedeling aan het land van vertrek en gedeeltelijke toedeling aan het land van vertrek.
- 7 Toedeling aan het land van oorsprong van passagiers of toedeling aan het land van vestiging van de eigenaar van de lading.
- 8 Toedeling aan het land in wiens gebied de uitstoot plaatsvindt.

Later heeft de SBSTA besloten dat de opties 2, 7 en 8 belangrijke nadelen hebben, zoals bijvoorbeeld dat in optie 2 scheepvaartemissies ook toebedeeld zouden worden aan landen die geen kust of havens hebben en geen mogelijkheid om beleid te voeren om emissies te beperken. Aan deze opties besteedt dit hoofdstuk daarom verder geen aandacht.

ad b Beleidsinstrumenten

De beleidsinstrumenten om emissies te beheersen kunnen grofweg in drie typen worden ingedeeld:

- maatregelen gericht op het sturen en stimuleren van de technische ontwikkeling;
- belastingen en heffingen;
- *cap-and-trade* systemen.

Onder de eerste groep vallen bijvoorbeeld R&D-subsidies, maar ook bijvoorbeeld eisen aan de CO₂-index van schepen. Belastingen en heffingen kunnen bijvoorbeeld gelegd worden op brandstofverkopen of op emissies. *Cap-and-trade* systemen, ten slotte, kunnen open of gesloten (alleen voor de scheepvaart) zijn, naast tal van andere ontwerpopties.

²² Eventueel kan een vierde aspect worden onderscheiden, namelijk het opstellen van betrouwbare inventarissen. Dit aspect valt buiten het onderwerp van dit onderzoek.



ad c Nationale doelstellingen

Wanneer emissies van internationale scheepvaart zouden worden toegedeeld aan landen, zou dat voor sommige landen een veel grotere invloed hebben op de totale nationale emissies dan voor andere landen. Het is duidelijk dat voor veel landen de huidige *baseline* zou moeten worden losgelaten. Maar toedeling vraagt niet alleen om aanpassing van de baseline, ook de doelstelling zou op een nieuwe manier kunnen worden vastgesteld, waarbij rekening wordt gehouden met het reductiepotentieel van de verschillende sectoren. Het onderzoek zal een korte beschouwing geven van de manier waarop de nationale doelstelling rekening kan houden met de toedeling van emissies van internationale scheepvaart.

15.6.2 Combinaties van beleidsmaatregelen en toedelingsopties

Deze paragraaf heeft als uitgangspunt dat staten alleen verantwoordelijk gesteld kunnen worden voor emissies als ze beleidsinstrumenten hebben om die emissies te beheersen. De toedelingsopties 1 en 3 t/m 6 vereisen daarvoor verschillende beleidsinstrumenten. Deze paragraaf onderzoekt welke combinaties logisch zijn.

Toedelingsoptie 1, geen toedeling, betekent dat de zeevaartsector zelf de taak op zich neemt om emissies te reduceren. De enige bestaande organisatie die een dergelijke taak zou kunnen uitvoeren is de IMO (CE, 2004a). Vanwege de gedifferentieerde verantwoordelijkheden van ontwikkelingslanden binnen het klimaatbeleid lijkt het momenteel ondenkbaar dat de IMO deze taak op zich zou nemen zonder dat er een zekere differentiatie van doelstelling voor de zeevaart zou zijn. Die differentiatie zou gebaseerd kunnen zijn op vlag (zoals nu ook de meeste regelgeving binnen IMO langs de lijnen van vlagstaten gaat), op basis van gebied waarin de emissies plaatsvinden (er is een precedent in de IMO-regelgeving met betrekking tot zwaveldioxide emissies), of op basis van routes. Om redenen die later duidelijk zullen worden (zie paragraaf 15.6.3) oordeelt dit rapport dat differentiatie op basis van routes in potentie het grootste milieueffect heeft. Wat betreft beleidsinstrumenten, het scala instrumenten wordt beperkt doordat IMO zelf geen belastingen heft en het onwaarschijnlijk is dat landen hun soevereiniteit over belastinggrondslag en –tarief zouden afstaan aan een internationale organisatie. Blijven over technische maatregelen, zoals technische en prestatienormen, en emissiehandel. Een beoordeling van de effectiviteit van deze combinatie van toedeling en beleidsinstrument staat in paragraaf 15.6.3.

Toedelingsoptie 3, toedeling op basis van het land van brandstofverkoop, vereist dat staten de brandstofverkoop kunnen beheersen. Hiervoor zijn instrumenten geschikt als brandstofheffingen (accijnzen, belastingen) of misschien ook een emissiehandelssysteem, waarbij de koolstof-inhoud van de brandstof bepalend zou moeten zijn voor de hoeveelheid in te leveren emissierechten²³. In alle gevallen is het resultaat dat de prijs van de brandstof stijgt, waardoor de vraag ernaar

²³ Een dergelijk systeem verschilt van het huidige Europese Emissiehandelsstelsel (ETS), waarbij installaties verplicht zijn om emissierechten in te leveren voor daadwerkelijke emissies, en dus niet voor emissies die pas plaatsvinden als de brandstof wordt verbrand.

afneemt. Een beoordeling van de effectiviteit van deze combinatie van toedeling en beleidsinstrument staat in paragraaf 15.6.3.

Toedelingsoptie 4, toedeling op basis van nationaliteit van de reder of vlag van het schip, vereist dat staten emissies van vloten kunnen beheersen. Dit kan met technische beleidsinstrumenten (technische normen of prestatienormen), met heffingen en met cap-and-trade systemen. In alle gevallen wordt het voor de betreffende vloten kostbaarder om broeikasgassen uit te stoten, hetzij omdat ze technische of operationele maatregelen moeten nemen om de uitstoot te beperken, hetzij omdat ze heffingen moeten afdragen of rechten moeten inleveren over emissies. Een beoordeling van de effectiviteit van deze combinatie van toedeling en beleidsinstrument staat in paragraaf 15.6.3.

Toedelingsopties 5, toedeling op basis van de route van een schip, of 6, toedeling op basis van de route van de lading, vereisen dat staten emissies van alle schepen op een bepaalde route kunnen beheersen. Net als bij optie 4 kan dit met technische beleidsinstrumenten (technische normen of prestatienormen), met heffingen en met cap-and-trade systemen. In alle gevallen wordt het op de betreffende routes kostbaarder om broeikasgassen uit te stoten. Bij optie 5 moeten de beleidsinstrumenten rechtstreeks aangrijpen op de emissies van schepen op bepaalde routes, terwijl bij optie 6 de emissies van een schip op een bepaalde route in sommige gevallen verdeeld moeten worden over de verschillende bestemmingen van de lading van dat schip. Een beoordeling van de effectiviteit van deze combinatie van toedeling en beleidsinstrument staat in paragraaf 15.6.3.

Tabel 24 laat zien welke combinaties van toedelingsopties en beleidsinstrumenten staten de mogelijkheid geven om emissies te beheersen.

Tabel 24 Combinaties van toedelingsopties en beleidsinstrumenten

Toedelingsoptie	Passende beleidsinstrumenten
1 (geen allocatie)	<ul style="list-style-type: none"> • Technisch (technische normen of prestatienormen voor schepen), gedifferentieerd naar route • Cap-and-trade systemen, gedifferentieerd naar route
2 (brandstofverkoop)	<ul style="list-style-type: none"> • Heffingen op brandstofverkoop • Cap-and-trade systemen op basis van koolstofinhoud van verkochte brandstof
3 (nationaliteit of vlag)	<ul style="list-style-type: none"> • Technisch (technische normen of prestatienormen voor vloten) • Emissieheffingen op basis van vlootemissies • Cap-and-trade systemen op basis van vlootemissies
4 (route schip) 5 (route lading)	<ul style="list-style-type: none"> • Technisch (technische normen of prestatienormen voor schepen op bepaalde routes) • Emissieheffingen op bepaalde routes • Cap-and-trade systemen voor emissies op bepaalde routes

Bron: CE, 2006f.



15.6.3 Beoordeling effectiviteit toedelingsopties en beleidsinstrumenten

Niet elke combinatie van beleidsinstrumenten en toedelingsopties die in paragraaf 15.6.2 is beschreven, is even effectief. De zeevaartsector heeft twee eigenschappen die de effectiviteit van bepaalde opties beperken.

Ten eerste is het betrekkelijk eenvoudig om de vlag van een schip of de hoofdzetel van een reder te veranderen. Schepen kunnen om tal van redenen worden 'omgevlagd', en dit gebeurt regelmatig, soms zelfs terwijl het schip op zee vaart. Reders, zeker de grotere bedrijven, zijn net als andere bedrijven niet gebonden aan een land bij de vestiging van hun hoofdzetel. Die wordt vaak gekozen op basis van juridische en fiscale kenmerken van een land. Het veranderen van een hoofdzetel hoeft niet gepaard te gaan met het veranderen van de plaats van de economische activiteiten.

Ten tweede kunnen veel zeeschepen brandstof bunkeren waarmee ze een zeer grote afstand kunnen varen. Hierdoor zijn die schepen relatief vrij om te kiezen waar ze brandstof bunkeren. In de praktijk blijkt ook dat bepaalde havens, zoals Rotterdam en Singapore, bovengemiddeld veel bunkerbrandstoffen verkopen.

Vanwege de eerste reden is toedelingsoptie 4, toedeling op basis van de nationaliteit van de reder of vlag van het schip, weinig effectief. Een kostenverhoging van het voeren van een bepaalde vlag zou leiden tot het uitvlaggen van schepen. Een kostenverhoging voor het hebben van een hoofdzetel in een bepaald land zou leiden tot het verplaatsen van de hoofdzetel. In beide gevallen zouden de totale emissies van de zeevaart niet of nauwelijks beperkt worden. Het voornaamste effect zou zijn dat emissies van bepaalde landen zouden verschuiven naar andere landen.

Vanwege de tweede reden is de effectiviteit toedelingsoptie 3, toedeling op basis van het land van brandstofverkoop, beperkt. Schepen die een groot aantal havens of bunkerplaatsen aandoen, kunnen hun plaats van bunkering vrij eenvoudig verleggen naar andere havens. (Sommige schepen, zoals veerboten, zijn wel gebonden aan bepaalde havens. Zij hebben natuurlijk minder uitwijkmogelijkheden). Er is een historisch precedent. In 1991 introduceerde Californië een heffing van 8,5% op de prijs van bunkerbrandstoffen. In die tijd had de markt voor bunkerbrandstoffen in Los Angeles een omvang van 4,5 miljoen vaten per maand. Na de introductie van de heffing besloten veel reders om in Panama te bunkeren. De omvang van de markt in Los Angeles schrompelde ineen tot 1 miljoen vaten per maand. Volgens veel betrokkenen was dit een direct gevolg van de introductie van de heffing. De heffing werd binnen een jaar afgeschaft²⁴.

Toedelingsopties 1, 5 en 6 hebben niet zulke grote nadelen als opties 3 en 4 (en eigenlijk ook opties 2, 7 en 8, die in een eerder stadium al zijn afgefallen vanwege grote nadelen). Toch zijn ook deze opties niet zonder problemen. Met name optie 6 vereist een grote databeschikbaarheid. Niet alleen moet van alle schepen

²⁴ Michaelis, Lauri, 1997: Special Issues in Carbon / Energy Taxation: Marine Bunker Fuel Charges, Paris: OECD, OCDE/GD(97)77.

bekend zijn hoeveel emissies ze hebben op bepaalde routes, ook moet van elk stuk lading bekend zijn op welke schepen het de reis van vertrekhaven tot aankomsthaven heeft afgelegd. In bepaalde segmenten van de zeevaart, zoals bijvoorbeeld de containervaart, kan dat alleen wanneer grote databestanden nauwkeurig en controleerbaar bijgehouden kunnen worden. Beide opties 5 en 6 vereisen dat er regionaal gedifferentieerd beleid gevoerd wordt voor de zeevaart. Met dergelijk beleid worden nu de eerste ervaringen opgedaan op een ander terrein, namelijk beperking van de zwaveluitstoot. Regionaal gedifferentieerd beleid is echter nog volstrekt geen gemeengoed binnen bijvoorbeeld de IMO.

De effectiviteit van optie 1 hangt af van de keuze van het beleidsinstrument. Technische beleidsinstrumenten kunnen wel de efficiëntie van de zeevaart verbeteren, maar niet een plafond aan de emissies opleggen. Ook de invloed op de vraag blijft beperkt, zeker wanneer, zoals gebruikelijk, de normen niet veel ambitieuzer worden vastgesteld dan de huidige stand van de techniek. Dan is immers het prijsverhogende effect ook beperkt. Cap-and-trade systemen kunnen wel een netto-plafond opleggen aan een sector en daarmee effectief zijn. De efficiëntie van het systeem hangt af van de omvang. Een koppeling van het zeevaartsysteem aan andere emissiehandelssystemen zou de efficiëntie ten goede komen. De opgave hier zou zijn om een systeem te ontwerpen dat effectief is maar ruimte laat voor regionale differentiatie. Hoewel er verschillende ideeën bestaan over het ontwerp van zo'n systeem (CE Delft, 2007) zijn dergelijke systemen nog nooit werkelijk ontworpen en is er daarom nog weinig zicht op eventuele zwakheden.

15.6.4 Conclusie

Concluderend, alle combinaties van toedeling van emissies en beleidsinstrumenten hebben grotere of kleinere nadelen. De twee meest veelbelovende combinaties zijn:

- De sector neemt een emissiereductiedoelstelling op zich en organiseert emissiehandel (toedelingsoptie 1). Het handelssysteem wordt gekoppeld aan andere emissiehandelssystemen om de efficiëntie te verhogen.
- Toedeling van emissies op basis van route van het vaartuig (toedelingsoptie 5) in combinatie met emissieheffingen of emissiehandel.

15.6.5 Beleidsopties in het kader van een eventueel Europees initiatief

Beleidsopties in het kader van een eventueel Europees initiatief zouden zich onderscheiden van de bovengenoemde wereldwijde afspraken doordat Europa bestaande beleidsinstrumenten kan inzetten, en doordat er minder internationale afstemming nodig is. Een Europees initiatief bestaat dus uit twee onderdelen: een definitie van de emissies die onder de verantwoordelijkheid van de EU vallen (paragraaf 15.6.6); en een keuze van een nieuw of bestaand beleidsinstrument om de emissies te beheersen (paragraaf 15.6.7).



15.6.6 Toe-eigening van emissies

Wanneer de EU het initiatief zou nemen om de uitstoot van broeikasgassen in de zeescheepvaart te beperken, dan zou er internationaal geen overeenstemming hoeven te zijn over de manier om emissies toe te delen aan landen. Toch zou het ook in dat geval noodzakelijk zijn om de emissies die de EU wil beheersen te onderscheiden van de wereldwijde emissies. In principe zou de EU verantwoordelijkheid kunnen nemen voor:

- 1 Emissies van in de EU verkochte scheepsbrandstoffen.
- 2 Emissies van schepen onder EU-vlag.
- 3 Emissies van schepen die vanuit of naar EU havens varen.
- 4 Emissies die samenhangen met het vervoer van goederen van of naar de EU.
- 5 Emissies in wateren waarover EU-lidstaten jurisdictie hebben.
- 6 Een andere uitsnede.

Vanwege redenen genoemd in paragraaf 15.6.3 zouden 1 en 2 leiden tot een verschuiving van de markt van respectievelijk in de EU verkochte bunkerbrandstoffen naar buiten de EU verkochte brandstoffen of van schepen onder EU-vlag naar schepen onder andere vlaggen. Het milieueffect zou door de verschuiving beperkt zijn. 4 vereist veel meer data dan nu beschikbaar zijn en 5 kan moeilijk zijn om te handhaven, zeker wanneer schepen weliswaar door EU-wateren varen maar geen havens in EU-lidstaten aandoen.

3 heeft niet de genoemde nadelen. Europa zou de verantwoordelijkheid op zich kunnen nemen voor emissies van schepen die naar EU-havens gevaren zijn. Eventueel zou de verantwoordelijkheid beperkt kunnen worden tot emissies in EU-wateren (een combinatie van 3 en 5).

15.6.7 Keuze van beleidsinstrument

De keuze van een beleidsinstrument voor regionaal klimaatbeleid voor zeevaart is nog open. In de beleidsdiscussie, die momenteel langzaam op gang komt, zijn verschillende instrumenten genoemd. De Europese Commissie heeft onderzoek laten doen naar een zevental beleidsopties, waarvan sommige op te vatten zijn als instrumenten voor klimaatbeleid, maar andere eerder als instrumenten voor informatievoorziening of voorbereidende beleidsopties (CE Delft, 2006b). De zeven zijn:

- vrijwillige convenanten;
- een verplichting om de IMO CO₂-index²⁵ te berekenen of toe te passen;
- een verplichting voor zeevaart om een beneden een bepaalde waarde van de IMO CO₂-index te blijven (een efficiëntienorm);
- het onderbrengen van koelgasemissies van zeevaart in EU-regelgeving of in de IMO CO₂-index;
- verplichte differentiatie van havengelden naar CO₂;

²⁵ De IMO CO₂-index is een maat voor de efficiëntie van een schip in haar gebruik. De index laat zien hoeveel CO₂ een schip gemiddeld heeft uitgestoten per ton vracht per zeemijl. De index wordt berekend door de CO₂ uitstoot gedurende een jaar te delen door de transportprestatie van het schip gedurende datzelfde jaar.

- het onderbrengen van zeevaart in het EU ETS;
- allocatie van zeevaartermissies aan EU-lidstaten.

De conclusie van het onderzoek is dat drie beleidsinstrumenten superieur zijn aan andere op het gebied van effectiviteit, juridische mogelijkheden, mogelijkheden voor monitoring en handhaving en mogelijkheden voor implementatie (CE Delft, 2006b). Dit zijn: het onderbrengen van zeevaart in ETS, volgens CE Delft de meest veelbelovende manier om regionaal klimaatbeleid voor zeevaart te voeren; een efficiëntienorm gebaseerd op de IMO CO₂-index; en differentiatie van havengelden op basis van de IMO CO₂-index.

De beoordeling is vooral gebaseerd op de effectiviteit van de beleidsvoorstellen en de mogelijkheden voor implementatie. Wat betreft effectiviteit scoren vrijwillige convenanten, een verplichte berekening van de CO₂-index, en het onderbrengen van koelgassen van zeeschepen in regelgeving laag. De laatste maatregel is weliswaar effectief en ook te realiseren tegen relatief lage maatschappelijke kosten, maar de hoeveelheid broeikasgassen die koelinstallaties op zeeschepen uitstoten is erg klein in vergelijking met de uitstoot van kooldioxide.

De implementatie van instrumenten die direct of indirect gebaseerd zijn op de IMO CO₂-index wordt bemoeilijkt door onduidelijkheid over de waarde van die index. Een recente analyse van de beschikbare gegevens over de index laat zien dat de index sterk afhangt van de grootte van een schip, het type schip en de beladingsgraad, die op zijn beurt vooral wordt bepaald door de conjunctuurcyclus. Omdat de meeste schepen bovendien uniek zijn, zou een effectieve CO₂-index moeten worden gedefinieerd als een functie van scheepsgrootte en scheepstype. De type-indeling kan echter problemen opleveren. Er zijn ongeveer tien hoofdklassen schepen, maar meer dan honderd subklassen en nog eens een veelvoud daarvan aan sub-subklassen. Het is niet ondenkbaar dat de CO₂-index per sub-subklasse verschilt, en dat er daarom honderden verschillende indexen gedefinieerd zouden moeten worden om de basis te vormen voor beleid. En dan nog blijft de indeling van schepen in klassen waarschijnlijk aanvechtbaar. De afhankelijkheid van de CO₂-index van de beladingsgraad roept de vraag op of de beladingsgraad buiten de index gehouden zou moeten worden. Als dat niet gebeurt, versterkt beleid dat gebaseerd is op de index de varkenscyclus²⁶ in de zeevaart. Als het wel gebeurt, laat het beleid niet de mogelijkheid om de index te verbeteren door de beladingsgraad te verhogen. Beide gevolgen zijn ongewenst.

15.6.8 Zeevaart in ETS

Zeevaart zou kunnen worden ondergebracht in ETS. Het is bijvoorbeeld mogelijk om scheepseigenaren verantwoordelijk te maken voor de broeikasgasemissies van hun schepen op bepaalde routes. Die routes zouden intra-EU routes kunnen

²⁶ Varkenscyclus is het verschijnsel in de economie dat overschotten en tekorten van een bepaald product of dienst elkaar in de tijd afwisselen. Dit treedt op wanneer aanbieders massaal reageren op de hoogte van de prijzen door te investeren in extra productiecapaciteit, maar tegen de tijd dat het aanbod daadwerkelijk is gestegen is de prijs alweer omgeslagen en ontstaat er dus overcapaciteit.



zijn of alle routes naar de EU. De laatste optie heeft de voorkeur, omdat het milieueffect dan groter is (meer emissies onder ETS).

Afgezien van deze grote lijnen, blijft er nog een aantal kwesties onopgelost:

- Hoe kunnen emissierechten verdeeld worden over de deelnemers in ETS. De manieren waarop emissierechten worden toebedeeld aan de huidige participanten is niet toepasbaar op de zeevaart. Veiling van rechten zou economisch efficiënt zijn, maar zou een zware last op de sector leggen. Het is de vraag of dat gewenst is. Een oplossing zou gelegen kunnen zijn in een veiling met terugsluis van de opbrengst naar de sector. De vraag blijft echter hoe die terugsluis vormgegeven zou kunnen worden.
- De geografische scope zou nader bestudeerd moeten worden. Bijzondere aandacht daarbij verdient de mogelijkheid voor ontwijkende, bijvoorbeeld door goederen te lossen in havens aan de grens van de EU, of door een tussenstop te maken in die havens.
- Juridische aspecten zoals de reikwijdte van EU regelgeving verdienen nader onderzoek.
- De verdelingseffecten over verschillende segmenten van de zeevaart (lijnvaart, vrije vaart, containervaart) zou in kaart gebracht dienen te worden, samen met mogelijkheden om de verdelingseffecten te beperken.
- Er zou een studie moeten komen naar de mogelijkheden om emissies in de zeevaartsector zelf terug te brengen: wat zijn de potentiëlen, en meer nog, wat zijn de kosten van deze opties?

15.7 Opties voor klimaatbeleid voor de binnenvaart

In tegenstelling tot de internationale zeevaart, valt de binnenvaart wel onder de nationale doelstellingen voor het Kyoto Protocol. Voor de binnenvaart zijn veel van dezelfde technische opties beschikbaar als voor de zeevaart (BIB, 2006). Klimaatbeleid voor de binnenvaart concentreert zich op R&D naar de vermindering van emissies, bijvoorbeeld via het Bureau Innovatie Binnenvaart.

Andere instrumenten om klimaatbeleid voor de binnenvaart te voeren, zoals bijvoorbeeld brandstofheffingen of mogelijk ook het onderbrengen van binnenvaart in ETS, zijn juridisch problematisch. De rijnvaart wordt geregeld door de Centrale Rijnvaart Commissie op basis van de Acte van Mannheim, die brandstofheffingen verbiedt (CE, 2004). Het bestaan van de Centrale Rijnvaart Commissie staat echter ter discussie. De Europese Commissie is voorstander van het uniformeren van de regelgeving voor de binnenvaart, wat onverenigbaar is met een speciaal regime voor de rijnvaart²⁷. Het is denkbaar dat bij een verandering van de juridische situatie bepaalde beleidsinstrumenten wel mogelijk worden.

²⁷ 'EU zet stevig in op einde Rijnvaartregime', Het Vasteland, Nieuwsbrief van de Koninklijke Schuttevaer, februari 2006



16 Generieke beleidsmaatregelen

16.1 Inleiding

Alle in de voorgaande hoofdstukken genoemde technische en niet-technische opties voor CO₂-reductie worden niet vanzelf toegepast. De overheid zal ze met beleid moeten stimuleren. We kunnen daarbij onderscheid maken tussen generieke en specifieke beleidsmaatregelen. Specifieke beleidsmaatregelen stimuleren bepaalde technische of niet-technische maatregelen. Voorbeelden zijn normstelling op voertuigniveau, BPM-vrijstelling voor hybride voertuigen en overheids campagnes voor bevordering van Het Nieuwe Rijden. Generieke maatregelen stimuleren CO₂-reductie maar laten actoren de ruimte om zelf te bepalen welke opties in hun geval het meest kosteneffectief of anderszins aantrekkelijk zijn. Emissiehandel en CO₂-differentiatie van belastingen zijn voorbeelden van generieke maatregelen.

Daarnaast kan een onderscheid gemaakt worden naar maatregelen die technisch maatregelen voor CO₂-reductie direct stimuleren of afdwingen (bijv. CO₂-norm voor voertuigen en verplichte bijmenging van biobrandstoffen) en maatregelen die via gedrag aangrijpen op aanschaf en gebruik van voertuigen. Dit laatste gebeurt vaak door het creëren van financiële prikkels (bijv. prijsbeleid, emissiehandel). De prikkels beïnvloeden meestal zowel het aankoopgedrag, in die zin dat de aanschaf van voertuigen met een lager verbruik of een lagere CO₂-emissie wordt bevorderd, als het gebruiksgedrag en het daaruit resulterende volume.

Technische maatregelen voor CO₂-reductie hebben echter indirect ook invloed op aankoopgedrag en volume hetgeen leidt tot aanvullende, indirecte CO₂-reducties. CO₂-normering van voertuigen leidt tot duurdere voertuigen, en voorbij de 140 g/km doelstelling van het 'ACEA-convenant' (zie paragraaf 9.8.2) ook tot hogere netto gebruikskosten (TNO, 2006a). Verplichte bijmenging van biobrandstoffen leidt tot hogere brandstofkosten. Hogere aanschaf- en gebruikskosten zullen een effect hebben op voertuigkeuzegedrag maar zullen ook leiden tot een reductie van het verkeersvolume.

Specifieke beleidsmaatregelen gericht op verschillende vervoermiddelen of vervoerwijzen zijn reeds behandeld in de voorgaande hoofdstukken. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op een aantal generieke vormen van beleidsmaatregelen.

16.2 Prijs- en fiscaal beleid

De relatieve hoge belastingen op auto's en brandstof in Europa hebben er overtuigend toe geleid dat auto's in Europa veel zuiniger zijn dan auto's in bijv. de Verenigde Staten. Fiscaal beleid, en prijsbeleid in het algemeen, kan dus zeker effectief zijn. In de huidige situatie van relatief hoge kosten voor voertuigen en brandstoffen in Europa blijkt echter de prijselasticiteit m.b.t. zuinige voertuigen en brandstoffen laag en de inkomenselasticiteit van de vraag hoger. Hoewel de ge-

middelste prijs van auto's in een bepaalde modelklasse in de EU met 12% is gedaald tussen 1996 en 2004 (CE, 2005a), is de gemiddelde inflatiegecorrigeerde prijs van nieuw verkochte auto's in Nederland tussen 1995 en 2004 gestegen met 15%.

De voordelen van technische maatregelen die voertuigefficiëntie verbeteren liggen bij de gebruiker, terwijl de kosten en risico's in eerste instantie bij de producent liggen. De gebruiker houdt slechts in beperkte mate rekening met besparingen. Producenten kunnen om deze reden de kosten van zuinige technologie maar beperkt doorberekenen in de kostprijs van voertuigen. Dit is een fout in het marktmechanisme en economische instrumenten zijn nodig om incentives te creëren op het moment van aankoop (CE, 2005a). Een CO₂-afhankelijke BPM en wegenbelasting kunnen een belangrijk middel zijn om brandstofverbruik een zwaardere rol te laten spelen bij het aankoopproces. In Nederland zijn BPM en wegenbelasting overigens indirect reeds gekoppeld aan CO₂-emissies. BPM is een functie van de kale voertuigprijs en duurdere voertuigen zijn in de regel zwaarder en minder zuinig dan goedkope voertuigen. De wegenbelasting is gekoppeld aan voertuiggewicht en correleert daarmee dus ook indirect met CO₂-emissies. Bij de invoering van een CO₂-differentiatie van voertuigbelastingen dient er dus voor gezorgd te worden dat de differentiatie in het nieuwe systeem progressiever is dan in het bestaande.

In een studie voor de Europese Commissie (COWI, 2002) wordt berekend dat het op een budgetneutrale manier volledig afhankelijk maken van de BPM en wegenbelasting van de CO₂-emissie van het voertuig in Nederland zou kunnen leiden tot een reductie van de CO₂-emissies van personenauto's met 7%.

Een CO₂-differentiatie van de BPM lijkt het meest voor de hand liggende middel om CO₂ en brandstofverbruik zwaarder mee te laten wegen in de aankoopbeslissing (RIVM/MuConsult, 2001; TNO, 2006a). In Europa bestaan er echter vooremens om aanschafbelasting (behalve BTW) af te schaffen en alleen nog wegenbelasting te heffen op wegvoertuigen. De Europese Commissie is wel voorstander van CO₂-differentiatie van belastingen en heeft een voorstel voor een richtlijn daarvoor gepubliceerd (COM(2005)261).

In (CE, 2005a) wordt aangegeven dat er met betrekking tot de effectiviteit van prijsbeleid onderscheid gemaakt moet worden naar korte-termijn elasticiteiten en lange-termijn elasticiteiten. Op korte termijn is het voor consumenten moeilijk om hun gedrag aan te passen maar op langere termijn kunnen ze op prijsprikkels reageren door een zuinige auto te kopen of dichterbij hun werk te gaan wonen. Lange-termijn prijselasticiteiten m.b.t. verkeersvolume, brandstofverbruik en voertuigbezit zijn een factor 2 tot 3 hoger dan korte-termijn prijselasticiteiten (Goodwin, 2003; VTPI, 2005).

Rekeningrijden en accijnzen beïnvloeden ook het autogebruik. Verhoging van de gebruikskosten zal tot volumereductie leiden en tot de aanschaf van zuiniger voertuigen. Accijnzen geven een directe prikkel om brandstofverbruik te reduceren, door minder of zuiniger te rijden of door een zuiniger auto aan te schaffen.



Rekeningrijden biedt daarnaast de mogelijkheid van ruimtelijke differentiatie waarbij de heffing hoger wordt op plaatsen waar de externe kosten van voertuigen hoger zijn (a.g.v. impact van voertuigemissies, ongevalskosten of variabele infrastructuurkosten). Ruimtelijke differentiatie naar CO₂-emissies van de tarieven van rekeningrijden lijkt echter nogal gekunsteld omdat CO₂-emissies geen lokaal maar een globaal probleem zijn. Door een generieke differentiatie naar Euroklasse en CO₂-emissies kan rekeningrijden wel een incentive bieden om voertuigen te gebruiken met een lagere milieu-impact.

Bij leaseauto's is er vanuit de gebruiker nog minder aandacht voor brandstofverbruik dan bij voertuigen in particulier eigendom. Ook vanuit de leasemaatschappij is die aandacht beperkt omdat brandstofkostenbesparing slechts over een leaseperiode van 2 tot 3 jaar meetelt. De leasemarkt is daardoor relatief ongevoelig voor prijsincentives, maar omvat wel 25% van de nieuwverkopen in Nederland. In het Verenigd Koninkrijk is de bijtelling voor lease-auto's gebaseerd op de CO₂-emissie van het voertuig in plaats van de prijs. Deze maatregel zorgt ervoor dat CO₂-emissies meegewogen worden in het voertuigkeuzegedrag van werknemers die een leaseauto ter beschikking krijgen en blijkt in het Verenigd Koninkrijk effectief tot reductie van de CO₂-emissie van het personenautoverkeer te leiden.

Prijsbeleid kan belastingneutraal worden geïmplementeerd, bijvoorbeeld door vaste belastingen te verlagen en variabele belastingen te verhogen of door de belasting op zuinige voertuigen te verlagen en die op onzuinige te verhogen. Een netto verhoging van de belastingdruk op autobezit en gebruik kan echter gerechtvaardigd zijn om de maatschappelijke kosten van autogebruik te internaliseren. Internalisatie van externe kosten gebeurt in de regel op basis van schadekosten uitgedrukt in Euro's per ton uitstoot van een bepaalde stof. Er zijn veel studies beschikbaar waarin deze schadekosten worden geschat. In het geval van CO₂ lopen de schattingen grosso modo uiteen van 0 tot 100 €/ton. Bij een personenauto die 200 g/km uitstoot komt dit overeen met schadekosten van 0 tot 0,02 €/km. Dat zijn geen bedragen waar dramatische gedragsveranderingen van mogen worden verwacht, zeker niet gegeven de lage prijselasticiteiten in deze sector. Om middels beprijzing effectief te kunnen sturen op de consumentenkeuze voor zuinige voertuigen dient de CO₂-toeslag dus waarschijnlijk hoger te zijn dan de schadekosten van CO₂.

Voor de luchtvaart staat de accijnsvrijstelling van kerosine ter discussie. Het heffen van accijns op kerosine zal leiden tot prijsverhogingen die leiden tot volumereductie en vliegtuigproducenten en luchtvaartmaatschappijen aansporen tot ontwikkeling resp. toepassing van zuiniger vliegtuigen. Daarnaast kan ook een al dan niet CO₂-gedifferentieerde heffing worden ingevoerd.

16.3 Emissiehandel

Emissiehandel is een maatregel die de markt, binnen bepaalde grenzen, de vrijheid geeft om emissiereducties daar te realiseren waar de kosten het laagst zijn. In zo'n systeem hebben vervuilers emissierechten die verhandelbaar zijn. Vervui-

lers waarvoor de vermijdingskosten hoger zijn dan de prijs van emissierechten zullen rechten inkopen. Vervuilers waarvoor de vermijdingskosten lager zijn dan de prijs van emissierechten zullen investeren in reductiemaatregelen en zullen deze financieren uit de verkoop van emissierechten (CE, 2005a).

Binnen de transportsector kan emissiehandel op verschillende niveaus worden gerealiseerd (CE, 2006a). Een inpassing van de transportsector in het EU-ETS (Emission Trading System) is een van de mogelijkheden. Voor luchtvaart (zie (CE, 2005b)), scheepvaart en spoorwegen, waar gebruikers grotere bedrijven zijn, zou dit relatief eenvoudig mogelijk zijn, onder de voorwaarde dat een bruikbaar CO₂-monitoringsysteem kan worden ingevoerd. Dit laatste zal waarschijnlijk gebaseerd zijn op brandstofverbruik, maar daarbij dient rekening te worden gehouden met het grensoverschrijdend karakter van m.n. lucht- en scheepvaart. De hoge vermijdingskosten voor technische maatregelen in de transportsector zullen echter maken dat opname in het ETS in eerste instantie vooral leidt tot CO₂-reducties buiten de transportsector en de aankoop van emissierechten door de transportsector. Op deze wijze draagt CO₂-reductie niet bij tot de vermindering van de afhankelijkheid van geïmporteerde olie.

Onderbrengen van het wegverkeer in het ETS is complexer. Individuele autobezitters zijn in dat geval de actoren die beslissen over aanschaf van zuinige technologie en het gebruik ervan. Emissierechten verhandelen op het niveau van individuele burgers leidt echter tot een complex handelssysteem met hoge transactiekosten. Producenten van brandstoffen hebben wel invloed op de well-to-tank (WTT) CO₂-prestatie van hun brandstoffen maar niet direct op het rendement waarmee ze verbrand worden. De broeikasgasemissies die vrijkomen bij de productie van brandstoffen vallen reeds onder het huidige ETS waarin alle grote industrie in Europa is ondergebracht. De WTT CO₂-prestatie kan dus m.n. verbeterd worden door bijmenging van een hoger percentage biobrandstoffen. Door de kosten van emissierechten door te berekenen in de brandstofprijzen kunnen brandstofproducenten echter ook de vraag beïnvloeden. Een zgn. upstream handelssysteem voor brandstofgerelateerde CO₂-emissies op het niveau van brandstofproducenten zou dus kunnen werken. Dit zou een losstaand systeem kunnen zijn, en kan zelfs op nationaal niveau worden toegepast, maar er zijn ook mogelijkheden om een dergelijk systeem in het ETS onder te brengen of het er indirect aan te koppelen. Een dergelijk emissiehandelssysteem in de context van CO₂-beleid voor de verkeerssector en in relatie tot verschillende flankerende maatregelen is nader uitgewerkt in (CE 2007).

In een emissiehandelssysteem dat geïmplementeerd is op het niveau van de brandstofproducenten dragen emissiereducties als gevolg van energiezuinig rijgedrag en verkeersmaatregelen via reductie van het totale brandstofverbruik ook bij aan het behalen van gestelde doelen. Hun effect wordt weliswaar niet separaat gekwantificeerd maar wel impliciet meegenomen in het monitoringmechanisme voor het handelssysteem. Op deze manier zou een emissiehandelssysteem mogelijk een deel van de problemen rond 'zachte' maatregelen voor wat betreft meetbaarheid kunnen oplossen.



Fabrikanten van voertuigen hebben wel invloed op het verbruik per gereden kilometer van de door hun geproduceerde voertuigen maar niet op de gereden kilometers, de rijstijl en de getankte brandstof (bijv. m.b.t. het percentage bijgemengde biobrandstof). Voor deze stakeholdergroep is ook een beperktere vorm van emissiehandel denkbaar, gebaseerd op de handel van emissierechten tussen autofabrikanten op basis van g/km CO₂-emissies op de typekeuringstest (zie bijv. (IEEP, 2005; TNO, 2006a)) en bindende targets opgelegd aan fabrikanten voor de verkoopgemiddelde CO₂-emissie van nieuw verkochte voertuigen. De precieze formulering van het target bepaalt dan welke fabrikanten rechten moeten kopen en welke kunnen verkopen. Naast personenauto's kunnen ook bestelauto's en vrachtwagens in dit systeem worden opgenomen. Voor die laatste categorie moet dan wel een CO₂-emissietest worden ontwikkeld.

16.4 Labelling

Alle EU-landen hebben op basis van EU Directive 1999/94/EC een systeem voor brandstofverbruikslabelling ingevoerd om consumenten te stimuleren om bij de aankoop van personenauto's meer rekening te houden met verbruik en CO₂-emissies. In de meeste landen beperkt het labellingsysteem zich tot het vermelden in de showroom en in reclames van verbruik en CO₂-emissies en de beschikbaarstelling van een gids met verbruikscijfers door de overheid. Nederland en enkele andere landen gaan verder en hebben een systeem ingevoerd met kleurcodes voor verschillende klassen. In Nederland wordt daarbij het geprojecteerd grondoppervlak gebruikt om auto's onderling vergelijkbaar te maken.

Het huidige EU-beleid m.b.t. labelling heeft volgens (ADAC, 2005) geen meetbare invloed op consumentengedrag en CO₂-emissie van nieuw verkochte auto's. Verbetering en harmonisatie van het labellingsysteem zou hierin verandering kunnen brengen (TNO, 2006a). Labelling kan ook worden gecombineerd met subsidies of CO₂-differentiatie van belastingen, zoals dat in Nederland sinds 1 juli 2006 bij de BPM gebeurt. Eerder Nederlands beleid heeft de effectiviteit daarvan aangetoond (CE, 2005a).

Behalve op voertuigniveau kunnen labellingsystemen worden ingevoerd voor andere producten die de CO₂-emissies van transport beïnvloeden. Dit geldt met name voor lage-rolweerstandsbanden en smeerolie met lage viscositeit (zie bijv. paragraaf 9.3 en 11.3). Consumenten kunnen alleen een juiste keuze maken op basis van objectieve informatie. Hiervoor zijn in ieder geval gestandaardiseerde testmethoden nodig. Labellingsystemen kunnen helpen om de resultaten van deze tests inzichtelijk te presenteren.

16.5 OV-beleid

OV is lange tijd in het Nederlandse beleid gezien als milieuvriendelijk alternatief voor de auto. In de praktijk functioneert OV echter eerder aanvullend dan als alternatief. Investerings in OV-capaciteit hebben in het geval van de trein wel geleid tot meer treinreizigers maar niet tot merkbaar minder autokilometers. Deze investeringen hebben overigens ook voornamelijk tot doel gehad om de bereik-

baarheid van stedelijke gebieden te bevorderen. Andere vormen van OV zijn de afgelopen jaren eerder gekrompen door privatisering en bezuinigingen als gevolg van stijgende loonkosten. Intussen groeit ook het besef dat niet alle OV goed is voor het milieu. Als de bezettingsgraag van bussen of treinen laag is, kan de CO₂-emissie per passagierskilometer zelfs hoger uitkomen dan van autovervoer (CE, 2003). Desalniettemin zou een grootschaliger stimulering van OV, bijvoorbeeld door middel van een hoogwaardig light-rail netwerk in de Randstad, op lange termijn wel degelijk een rol kunnen spelen bij het creëren van een structurele oplossing voor bereikbaarheid en verlaging van CO₂-emissies. Om dat te kunnen beoordelen is wel meer inzicht nodig in de CO₂-vermijdingskosten die gepaard gaan met een modal shift van de personenauto naar OV.

16.6 Ruimtelijke ordenings- en infrastructuurbeleid

In het huidige ruimtelijke ordeningsbeleid speelt CO₂ een bescheiden rol. Bij de milieubeoordeling van infrastructurele plannen wordt CO₂ in de regel wel in de berekeningen meegenomen maar weegt het minder zwaar dan bijvoorbeeld bereikbaarheid, economische ontwikkelingen en emissies van NO_x en PM₁₀ in de uiteindelijke afweging. Eind jaren '90 is bijvoorbeeld de 'Verkeersprestatie op Locatie' (VPL) ontwikkeld, die erop is gericht wijken zo te ontwikkelen dat de autokilometrages worden teruggebracht. De overall impact van dit beleid is echter beperkt geweest.

Ruimtelijke ordening zal op lange termijn echter van groot belang zijn bij het scheppen van mogelijkheden om te komen tot beheersing van volumegroei of volumereductie in de transportsector. Woon-werkverkeer beslaat een belangrijk deel van het personenvervoer. Dit kan alleen in omvang gereduceerd worden wanneer de afstand tussen wonen en werken wordt verkleind. Dit is op lange termijn mogelijk door een combinatie van ruimtelijke ordening en vestigingsbeleid voor bedrijven. Hetzelfde geldt bijvoorbeeld voor verplaatsingen voor winkelen en recreatie. Omdat veranderingen in ruimtelijke ordening een lange doorloop hebben en bovendien de bestaande inrichting een lange levensduur, moet er op tijd met dit beleid begonnen worden, wil het in 2030 of 2040 een significant effect kunnen hebben.

Verkleining van de afstand tussen wonen, werken en andere activiteiten is ook noodzakelijk om een shift van de auto naar andere vervoerwijzen zoals OV, fietsen en lopen mogelijk te maken. Fietsen kan als alternatief verder worden gestimuleerd door gericht infrastructuurbeleid.

Bij de aanleg van weginfrastructuur kan voorts aandacht worden besteed aan het minimaliseren van 'omrijkilometers' en het bevorderen van een gelijkmatige doorstroming die leidt tot lager brandstofverbruik en lagere emissies. Op de lange termijn kunnen intelligente vervoerssystemen ook een rol spelen bij het energie-efficiënter maken van infrastructuur.



16.7 Overige maatregelen

16.7.1 Duurzaam inkopen

Aanschaf van zuinige voertuigen door de overheid ('public procurement') kan door de beperkte omvang van de voertuigvloot bij overheden geen significant effect hebben op totale CO₂-emissies, maar heeft een voorbeeldfunctie en kan helpen om een initiële markt te creëren voor nieuwe technologieën. In die markt kunnen gebruikerservaringen worden opgedaan. Kostenreducties door schaal-effecten kunnen vooral worden gestimuleerd wanneer verschillende overheden samenwerken om gezamenlijk grotere aantallen voertuigen van hetzelfde model aan te schaffen.

16.7.2 Communicatie

Verder zijn communicatie en voorlichting belangrijke ondersteunende instrumenten voor alle genoemde maatregelen om m.n. voertuiggebruikers bewust te maken van hun rol in het proces en te informeren over effectieve mogelijkheden om CO₂ en kosten te reduceren.

16.7.3 Stimulering R & D en demonstratieprojecten

Om strenger CO₂-beleid te kunnen invoeren is het van belang dat er technische en andere opties beschikbaar zijn om CO₂-emissies effectief te reduceren ('probleem-oplossingskoppel'). Om ervoor te zorgen dat nieuwe energiezuinige technieken worden ontwikkeld en op de markt gebracht is R&D- en innovatiebeleid zinvol. Dit omvat ondermeer subsidiëring van R&D-activiteiten en van demonstratieprojecten.

De afgelopen decennia was stimulering van innovatie door subsidiëring van R&D en demonstratieprojecten een belangrijk onderdeel van het Nederlandse milieu-beleid. Voor de transportsector zijn in het kader van SSZ (Schoon, Stil & Zuinig) en andere programma's veel projecten gesubsidieerd op het gebied van nieuwe aandrijftechnologie of nieuwe brandstoffen. De meeste van deze projecten hebben echter niet geleid tot een marktrijp product of tot daadwerkelijke marktintroductie. Dit heeft twee belangrijke oorzaken. Allereerst bestaat de indruk dat veel projecten meer subsidiegedreven waren dan dat ze voortkwamen uit een werkelijke ambitie van de betrokken fabrikanten om een nieuw product op de markt te brengen. Dit leidde tot onvoldoende commitment bij de fabrikanten om tegenslagen in de ontwikkel- en demonstratiefase te overwinnen. Fabrikanten lieten het afweten als de voertuigen door mankementen stil stonden en het projectbudget op was. Ten tweede waren veel demonstraties gericht op niche applicaties. Het idee was dat nieuwe producten in een nichetoepassing kunnen rijpen. In nichetoepassingen worden bepaalde milieuaspecten van de techniek hoger gewaardeerd waardoor er geld en ruimte is om kinderziekten te overwinnen die in de massamarkt niet getolereerd zouden worden. Vanuit de nichetoepassingen zouden leer- en schaal-effecten uiteindelijk leiden tot verbeterde producten en reductie van kosten ('strategisch niche management'). Stedelijk OV, bijvoorbeeld, was

een belangrijke niche voor LPG, aardgas, elektrische en hybride aandrijving omdat gemeentelijke overheden veel geld over hadden om ervaring op te doen met schone technieken. Liberalisering van deze markt heeft echter geleid tot een veel bedrijfsmatiger aanpak waarin geen ruimte meer is voor deze 'speeltuin'-functie. Al met al kan geconcludeerd worden dat Nederlands innovatiebeleid m.b.t. zuinige voertuigen niet heeft geleid tot belangrijke doorbraken van innovaties in de markt.

Geconcludeerd kan worden dat stimulering van R&D en demonstratieprojecten weliswaar van belang kan zijn voor het beschikbaar krijgen van effectieve oplossingen maar dat de vorm waarin deze beleidsmaatregel wordt geïmplementeerd van groot belang is voor het succes ervan.

16.7.4 Tijdelijke (specifieke) stimuleringsmaatregelen

De in de voorgaande paragrafen beschreven maatregelen zijn grotendeels beschreven vanuit het perspectief van generieke stimulering van energiezuinige technieken en energiezuinig aankoop- en gebruiksgedrag. Naast dit generieke beleid is ook specifiek beleid mogelijk en in sommige gevallen noodzakelijk. Dit laatste is met name het geval bij de marktintroductie van veelbelovende technische opties. Deze hebben in de regel last van kip-ei problemen m.b.t. kosten en bijvoorbeeld beschikbaarheid van infrastructuur. Producten zijn duur zolang er weinig van geproduceerd worden en worden daardoor weinig verkocht. Voor voertuigen op alternatieve brandstoffen is nieuwe distributie-infrastructuur nodig maar die rendeert pas als er voldoende van die voertuigen op de weg zijn. En dat lukt niet zolang er onvoldoende tankmogelijkheden zijn.

Overheden kunnen de introductie van nieuwe technologie op verschillende manieren stimuleren:

- subsidiëring of financiering van nieuwe infrastructuur;
- (tijdelijke) subsidiëring van nieuwe technologie;
- (tijdelijke) vrijstelling van belasting of belastingverlaging voor nieuwe technologie.

Van groot belang is dat de stimulering altijd van tijdelijke aard moet zijn. Op de lange termijn moet er een solide business case voor de nieuwe technologie zijn en moet de technologie net als zijn concurrenten bijdragen aan het genereren van overheidsinkomsten. Generieke maatregelen zoals CO₂-differentiatie van belastingen of CO₂-emissiehandel kunnen belangrijk bijdragen aan het creëren van een duurzame business case voor technologieën die bijdragen aan CO₂-reductie maar daardoor duurder zijn in productie dan minder duurzame alternatieven.



17 Bijdrage van efficiencyverbetering, biobrandstoffen en volume-effecten aan het bereiken van doelen voor 2030: een eenvoudige scenarioverkenning

17.1 Inleiding

CO₂-emissies van vervoer worden grosso modo bepaald door het vervoersvolume en de CO₂-emissies per eenheid vervoersvolume. Deze laatste worden bepaald door het energetisch rendement van de voertuigaandrijving en de specifieke CO₂-emissies per eenheid energie van de gebruikte energiedragers. Een netto reductie van CO₂-emissies kan dus worden bereikt door reducties op deze drie fronten. Voor het behalen van een doel zijn maatregelen m.b.t. voertuigrendement, ketenemissie van brandstoffen en volume in hoge mate uitwisselbaar ('communicerende vaten'). De potentiëlen voor efficiencyverbetering en reductie van ketenemissies zijn in de vorige paragrafen toegelicht. In deze paragraaf wordt op basis van een hypothetische 'back-of-the-envelope' berekening verkend in welke mate naast technische maatregelen volumebeleid nodig is voor het halen van ambitieuze CO₂-reductiedoelstellingen in de verkeerssector.

De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van data uit het GE-scenario zoals uitgewerkt in de WLO-studie (MNP, 2006a). Deze studie geeft volumedata en CO₂-emissiecijfers voor wegverkeer en overige transportwijzen voor 2000, 2010, 2020, 2030 en 2040. Op basis van interpolatie zijn data voor 2005 afgeleid die als referentie dienen voor de hierna gepresenteerde berekeningen. Voor een vergelijking met beleidsdoelen zou 1990 een meer voor de hand liggend referentiejaar zijn, maar m.n. voor de overige vervoerwijzen is het lastig om uit bestaande statistieken data voor 1990 samen te stellen die consistent zijn met de data voor 2000 e.v. uit (MNP, 2006a). Onderzocht wordt hoe in 2030 een reductie van 50% t.o.v. 2005 kan worden bereikt door een combinatie van efficiencyverbetering, biobrandstoffen en volumebeleid. De CO₂-emissies van het wegverkeer zijn tussen 1990 en 2005 met zo'n 38% toegenomen zodat 50% reductie t.o.v. 2005 neer komt op ongeveer 30% reductie t.o.v. 1990. Dit percentage komt overeen met de recent in het nieuwe regeerakkoord voor 2020 vastgestelde CO₂-reductiedoelstelling voor heel Nederland.

Een vergelijkbare exercitie, maar dan t.o.v. van het SE-scenario uit de WLO-studie en toegespitst op een specifiek beleidsscenario voor vermindering van energiegeerelateerde CO₂-emissies in alle sectoren in Nederland is te vinden in Green4sure (CE 2007).

17.2 Scenario's

Het NMP 4 geeft aan dat de ambitie van het Nederlands beleid m.b.t. CO₂-reductie in de verkeerssector ligt op 40 - 60% reductie in 2030 t.o.v. 1990. In deze hypothetische scenario-exercitie gaan we uit van een beoogde reductie van 50% in 2030 t.o.v. 2005, d.w.z. dat er naar gestreefd wordt dat de CO₂-emissies

van de verkeerssector in 2030 nog maar de helft bedragen van de emissies in 2005. In eerste instantie gaan we er van uit dat alle modaliteiten in gelijke mate aan deze reductie bijdragen en dat dus voor iedere vervoerwijze een 50% reductie moet worden gerealiseerd. In werkelijkheid zal de benodigde reductie natuurlijk verdeeld worden over de verschillende modaliteiten naar rato van de reductiepotentiëlen en de bijbehorende kosteneffectiviteiten, maar voor de eenvoud stellen we hier de doelen per modaliteit gelijk. Het gaat tenslotte om een indicatieve verkenning van het spanningsveld tussen technische maatregelen en volumewontwikkelingen.

Zoals reeds eerder aangegeven is economische groei een belangrijke factor m.b.t. het halen van doelstellingen op lange termijn omdat deze het volume van de transportactiviteiten sterk beïnvloedt. Daarnaast bepaalt het bij personenvervoer over de weg ook consumententrends m.b.t. de aanschaf van grotere of luxere voertuigen. Hoewel de gemiddelde prijs van auto's in een bepaalde modelklasse in de EU met 12% is gedaald tussen 1996 en 2004 (CE, 2005a), is de gemiddelde inflatiegecorrigeerde prijs van nieuw verkochte auto's in Nederland tussen 1995 en 2004 gestegen met 15%.

Zoals in voorgaande hoofdstukken is beschreven, is bij personenauto's verlaging van de CO₂-emissie per kilometer mogelijk door gebruik van energiezuinige technieken, duurzame brandstoffen en het gebruik van kleinere voertuigen. Deze laatste optie is op triviale gronden altijd kosteneffectief, maar druist in tegen consumententrends. Bij het goederenvervoer over de weg is het potentieel van energiezuiniger technieken beperkter en is het gebruik van kleinere voertuigen maar in beperkte mate een optie. In deze sector zullen volumemaatregelen dus mogelijk sneller nodig zijn.

Onderstaande figuren verkennen het potentieel van technische maatregelen op voertuigniveau, de potentiële bijdrage van de toepassing van duurzame brandstoffen en de eventuele noodzaak van volumemaatregelen voor het halen van de 50% reductiedoelstelling voor 2030. De berekeningen zijn gebaseerd op baseline prognoses voor de CO₂-emissie van verschillende vervoerwijzen in het GE-scenario zoals door MNP in 2006 uitgewerkt voor de WLO-raming (MNP, 2006a). Deze getallen omvatten alle personen en goederenvervoer over de weg en mobiele werktuigen alsmede een deel van rail (alleen dieseltractie), scheepvaart (alleen binnenvaart en voor zeescheepvaart emissies op in Nederlandse wateren) en luchtvaart (alleen LTO-emissies).

Het GE-scenario is een beleidsarm scenario, waarin de CO₂-emissiefactoren (g/km) voor de verschillende vervoerwijzen na 2010 min of meer constant blijven. Als gevolg van volumegroei stijgen in dit scenario de CO₂-emissies van de verschillende vervoerwijzen zoals aangegeven in Tabel 25.

Deze ontwikkeling is, uitgedrukt in de relatieve volumegroei t.o.v. 2005, eveneens weergegeven in Figuur 86. De gele t/m rode kolommen geven de volumegroei per deelsector tussen 2005 en 2030. De blauwe kolommen geven de groei van de CO₂-emissies in 2030 t.o.v. 2005 weer voor resp. personenauto's, het



vrachtvervoer over de weg (bestelauto's en vrachtwagens) plus de overige modaliteiten (m.n. lucht- en scheepvaart), en voor de totale directe CO₂-emissies van de transportsector.

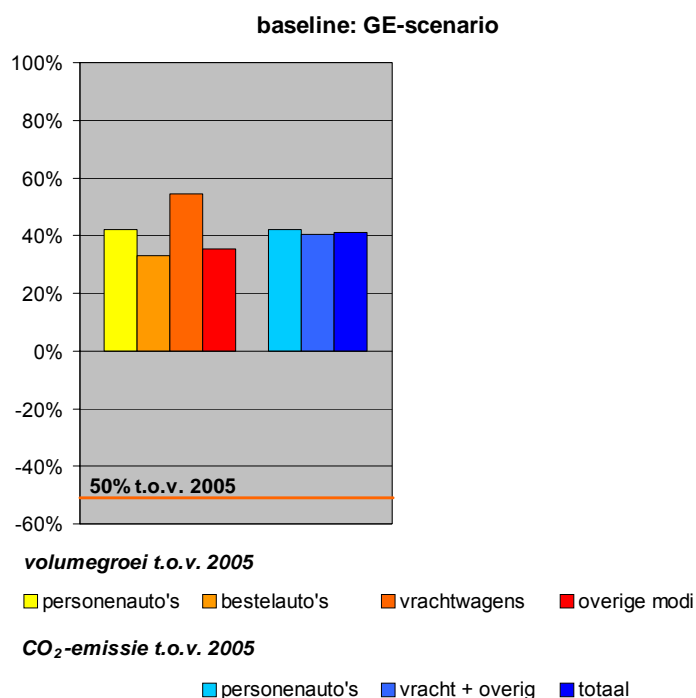
Tabel 25 Ontwikkeling van CO₂-emissies door verkeer in het GE-scenario

	2005	2030	Groei
Personenauto's	20,5	29,1	42%
Bestelauto's	4,3	5,7	33%
Vrachtwagens	6,9	10,7	55%
Overige modi	13,1	17,7	35%

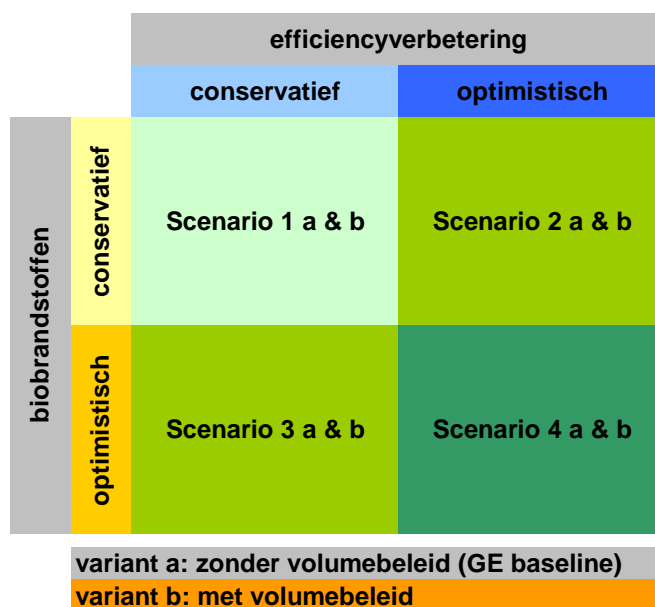
Figuur 87 beschrijft vervolgens de kenmerken van vier scenario's waarin wordt onderzocht hoe met verschillende combinaties van maatregelen m.b.t. efficiencyverbetering, biobrandstoffen en volumebeleid de gestelde doelen kunnen worden gehaald. De in de verschillende scenario's veronderstelde mate van efficiencyverbetering en toepassing van biobrandstoffen is hieronder in Tabel 26 weergegeven. Voor efficiencyverbetering betreft dit relatieve reducties van het verbruik in l/100km t.o.v. de 2030 GE-baseline. Een 50% reductie komt erop neer dat personenauto's in 2030 gemiddeld 3 tot 4 l/100km verbruiken. Voor overige vervoerwijzen zijn kleinere haalbare reducties verondersteld dan voor personenauto's. Het voor biobrandstof vermelde percentage is het aandeel biobrandstof dat wordt bijgemengd in benzine en diesel. Voor 2030 wordt verondersteld dat dit 2^e generatie biobrandstoffen betreft (bijv. ethanol uit lignocellulose en biodiesel via biomass-to-liquid processen) met een well-to-wheel broeikasgasreductie van 90%.

Per scenario geeft variant **a** de behaalde emissiereducties weer zonder beleid dat ingrijpt op de groei van het verkeer en geeft variant **b** de mate van volume-groei of krimp weer waarmee, in combinatie met de technische maatregelen uit variant **a**, de voor 2030 gestelde CO₂-reductiedoelen worden gehaald.

Figuur 86 Ontwikkeling van transportvolume en CO₂-emissies in het baseline scenario (GE). Percentages geven de groei van volume en CO₂-emissie weer tussen 2005 en 2030



Figuur 87 Kenmerken van vier scenario's waarin wordt onderzocht hoe met verschillende combinaties van maatregelen m.b.t. efficiencyverbetering, biobrandstoffen en volumebeleid de gestelde doelen kunnen worden gehaald



Tabel 26 Aannames in de verschillende scenario's m.b.t. efficiencyverbetering en bijmengpercentage 2e generatie biobrandstoffen. Efficiencyverbetering is gedefinieerd t.o.v. de 2030 baseline

	<i>conservatief</i>		<i>optimistisch</i>	
	<i>efficiency¹</i>	<i>biobrandstof²</i>	<i>efficiency¹</i>	<i>biobrandstof²</i>
personenauto's	30%	10%	50%	50%
bestelauto's	20%	10%	40%	50%
vrachtwagens	10%	10%	25%	50%
overige modi	10%	10%	20%	25%

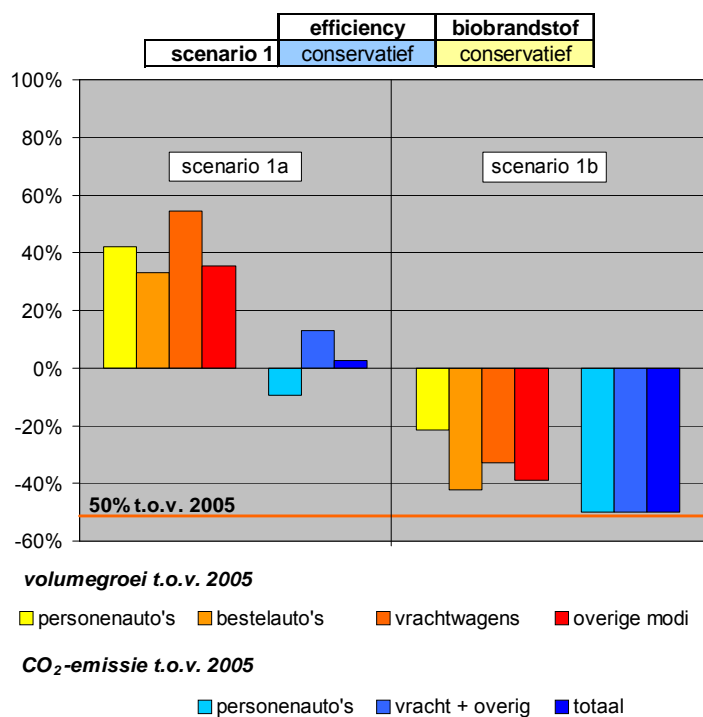
¹) gem. reductie CO₂-emissie (g/km) t.o.v. 2030 baseline

²) bijmeng % 2^e generatie biobrandstof

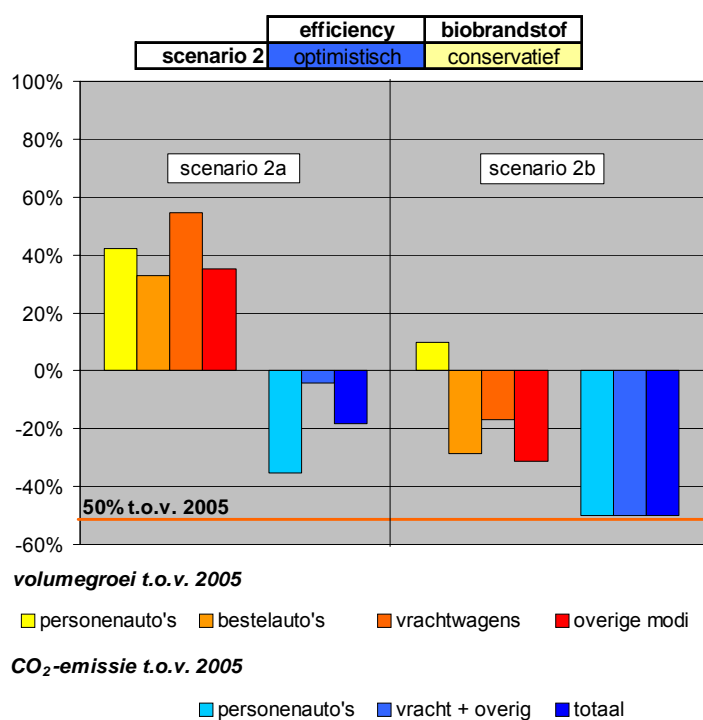
Figuur 88 laat zien dat onder conservatieve aannames voor efficiencyverbetering en toepassing van biobrandstoffen (scenario 1) en zonder volumebeleid (scenario 1a) de CO₂-emissie van personenauto's in 2030 iets lager is dan in 2005 en dat de gecombineerde emissie van goederenvervoer en de overige modi stijgt. De totale CO₂-emissie van de verkeersector komt 3% hoger uit dan in 2005. Om in scenario 1 het gestelde doel van 50% te halen is bij personenauto's een volumereductie nodig van 22% t.o.v. 2005. Voor dezelfde relatieve reductie is bij bestelauto's en vrachtauto's een volumereductie van 42% resp. 33% t.o.v. 2005 nodig en is bij de overige vervoerwijzen een 39% reductie nodig. Een deel van de benodigde krimp of rem op de volumegroei zal overigens vanzelf ontstaan door de hogere kosten voor transport die het gevolg zijn van CO₂-beleid dat gericht is op de implementatie van de genoemde efficiencyverbetering c.q. toepassing van biobrandstoffen.

Figuur 89, Figuur 90 en Figuur 91 geven op vergelijkbare wijze de resultaten voor scenario's 2, 3 en 4 weer. Opvallende conclusie is dat voor het halen van een 50% reductie bij personenauto's in deze scenario's een volumegroei mogelijk blijft t.o.v. 2005, uiteenlopend van 10% in scenario 2b tot zelfs 82% in scenario 4b. Voor bestelauto's is in scenario's 2b en 3b een krimp nodig maar is in scenario 4b een lichte groei mogelijk. Bij vrachtwagens is er groei mogelijk in scenario's 3b en 4b, zij het veel minder dan de in het baseline-scenario voorziene groei. Voor de overige modes is het veronderstelde technisch reductiepotentieel zo klein dat in alle gevallen volumereductie nodig is om een 50% reductie van CO₂-emissies t.o.v. 2005 te realiseren. De benodigde volumeaanpassingen zijn samengevat in Tabel 27.

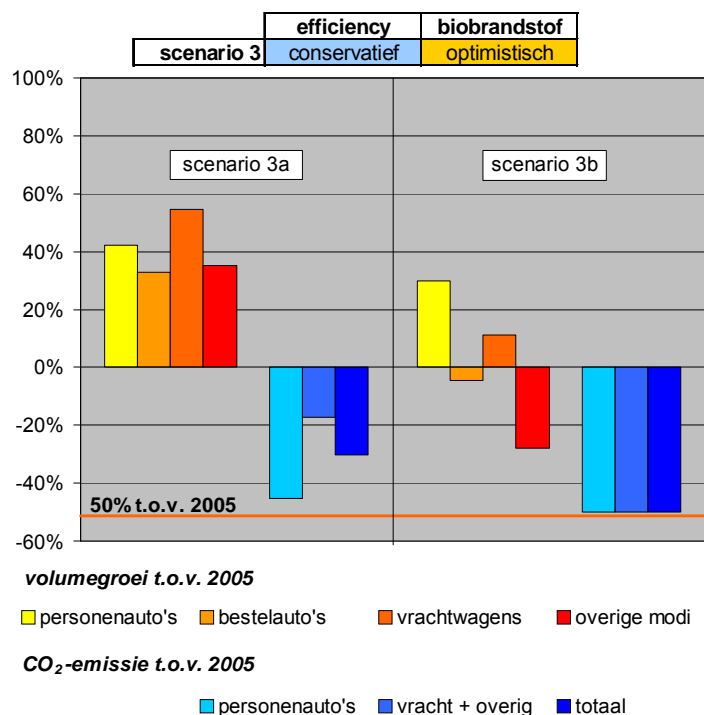
Figuur 88 Resultaten voor scenario 1 a en b. Percentages geven de groei van volume en CO₂-emissie weer tussen 2005 en 2030



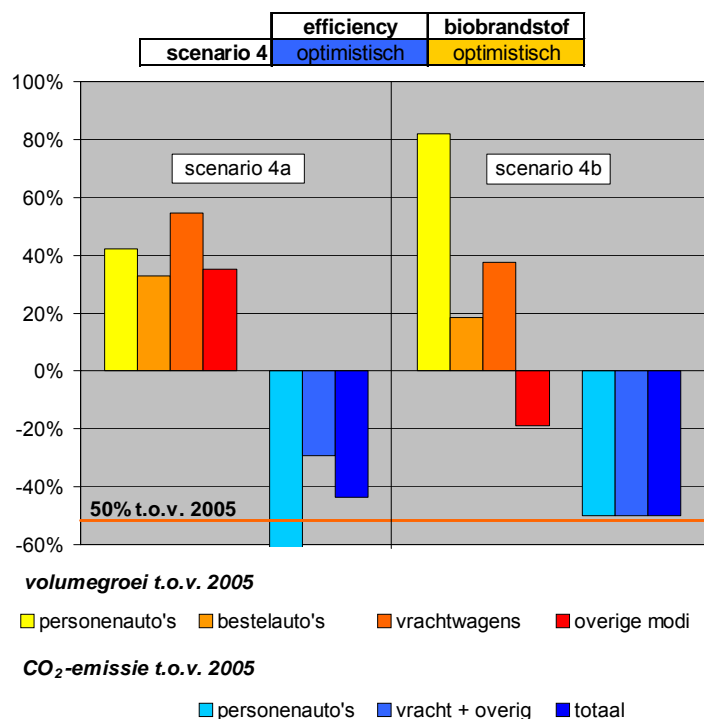
Figuur 89 Resultaten scenario 2 a en b. Percentages geven de groei van volume en CO₂-emissie weer tussen 2005 en 2030



Figuur 90 Resultaten scenario 3 a en b. Percentages geven de groei van volume en CO₂-emissie weer tussen 2005 en 2030



Figuur 91 Resultaten scenario 4 a en b. Percentages geven de groei van volume en CO₂-emissie weer tussen 2005 en 2030



Tabel 27 Ontwikking van CO₂-emissies en transportvolume per scenario

volumeontwikkeling									
t.o.v. 2005	baseline	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
personenauto's	42%	42%	-22%	42%	10%	42%	30%	42%	82%
bestelauto's	33%	33%	-42%	33%	-28%	33%	-5%	33%	18%
vrachtwagens	55%	55%	-33%	55%	-17%	55%	11%	55%	38%
overige modi	35%	35%	-39%	35%	-31%	35%	-28%	35%	-19%

ontwikkeling CO₂-emissies									
t.o.v. 2005	baseline	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b
personenauto's	42%	-9%	-50%	-35%	-50%	-45%	-50%	-61%	-50%
goederenvervoer over weg	46%	15%	-50%	-7%	-50%	-30%	-50%	-44%	-50%
overige modes	35%	11%	-50%	-2%	-50%	-6%	-50%	-17%	-50%
totaal	41%	3%	-50%	-18%	-50%	-30%	-50%	-44%	-50%

N.B.: De b-varianten per scenario geven de volumereductie t.o.v. 2005 weer die in combinatie met het veronderstelde potentieel van technische maatregelen en biobrandstoffen nodig is voor het halen van een 50% CO₂-reductiedoelstellingen voor 2030. Negatieve getallen zijn een reductie. Positieve getallen geven in geval van volume en b-varianten per scenario de toegestane groei van het volume aan

17.3 Conclusies

Naast maatregelen die het verbruik van voertuigen verminderen dan wel de ketenemissies van brandstoffen verlagen, zijn in verschillende van de hierboven beschreven scenario's voor deelsectoren netto volumereducties t.o.v. 2005 nodig om in 2030 tot een CO₂-reductie van 50% per deelsector t.o.v. 2005 te komen. Het is de vraag of dit realistisch haalbaar kan worden geacht, zeker wanneer wordt uitgegaan van economische groei. Stabilisatie van de omvang van de transportsector op het niveau van 2005 lijkt al een hele uitdaging.

In het meest optimistische scenario ten aanzien van efficiency en bijmenging van biobrandstoffen kan met de in het GE-scenario voorspelde groei van de personenautosector de 50% reductiedoelstelling ruim gehaald worden. Daarbij dient echter aangetekend te worden dat de veronderstelde 50% bijmenging van biobrandstoffen zeer optimistisch is, zeker wanneer dit op grotere schaal in Europa of ook daarbuiten zou worden toegepast. Waarschijnlijk is de wereldwijde beschikbaarheid van biobrandstoffen daarvoor ontoereikend. Om van de voor 2010 voorzien 5,75% te komen tot het als 'conservatieve' aannahme genoemde niveau van 10% bijmenging van biobrandstoffen is al een zeer forse beleidsinspanning nodig.

Om in het meest optimistische scenario in de overige sectoren ook een 50% reductie te halen is op basis van de aannames voor het potentieel van efficiencyverbetering voor het goederenvervoer een lagere volumegroei nodig dan voorspeld in het GE-scenario en voor de overige sectoren zelfs een netto reductie.

In de praktijk ligt het vanzelfsprekend meer voor de hand om in plaats van reductiedoelen per vervoerwijze één totaaldoel voor de transportsector te stellen, waaraan de verschillende vervoerwijzen naar rato van kosteneffectiviteit en reductiepotentieel bijdragen. Bovenstaande exercitie geeft echter op aanschouwelijke wijze aan wat het spanningsveld is tussen technische maatregelen en volumebeleid voor het halen van ambitieuze lange-termijn CO₂-reductiedoelen in de transportsector. De uitkomsten zijn dusdanig robuust dat een andere verdeling



van de doelstelling over de verschillende modaliteiten niet tot een wezenlijke andere conclusie zou leiden.

De volume-ontwikkelingen die nodig zijn om ambitieuze lange-termijn doelen te halen kunnen deels autonoom plaatsvinden, wanneer de economische groei lager uitvalt dan wat in het GE-scenario verondersteld is. Voor een belangrijk deel zal volumereductie of demping van de volumegroei echter middels gericht beleid moeten worden gerealiseerd. Dit beleid kan een veelheid aan maatregelen omvatten:

- prijsbeleid:
 - kilometerheffing;
 - verhoging van accijns op brandstoffen;
 - andere heffingen;
 - internalisatie van de schaduwkosten van CO₂ in de prijs van transport d.m.v. heffingen of d.m.v. een vorm van emissiehandel;
- infrastructuurbeleid;
- ruimtelijke ordeningsbeleid;
- OV-beleid.



18 Conclusies m.b.t. deel II

Deel II van dit rapport geeft een overzicht van de technische en niet-technische maatregelen waarmee de CO₂-emissie van personenauto's, bestelauto's, vrachtwagens, bussen, railvervoer, vliegtuigen en schepen kan worden gereduceerd. Opties worden beschreven in termen van werkingsprincipe, CO₂-reductiepotentieel, kosten, voor- en nadelen en synergie met andere beleidsaspecten (bijv. luchtverontreiniging, congestie of veiligheid). Ook wordt nader ingegaan op de verschillende specifieke en generieke beleidsinstrumenten waarmee de toepassing van deze opties kan worden gestimuleerd.

M.b.t. de technische en niet-technische opties kunnen de volgende conclusies worden geformuleerd.

Personenauto's

- Personenauto's kunnen tussen nu en 2030 door technische maatregelen aan motor, transmissie en voertuig 40% tot 50% zuiniger worden. De belangrijkste opties daarbij zijn verbeteringen aan de verbrandingsmotor, toepassing van hybride aandrijving, en verlaging van voertuiggewicht, rolweerstand en luchtweerstand.
- De netto CO₂-reductie op langere termijn hangt echter wel af van autonome ontwikkelingen m.b.t. voertuigomvang, luxe en voertuiggewicht en de verdeling van verkopen over voertuigen in verschillende grootteklassen.
- Lage rolweerstandsbanden en smeermiddelen met een lage viscositeit leveren slechts enkele procenten CO₂-reductie op maar kunnen wel binnen korte tijd op de gehele vloot worden toegepast.
- Brandstofcelvoertuigen leveren een verdere verbetering van het voertuigrendement. De netto CO₂-winst hangt echter af de bronnen waaruit de benodigde waterstof wordt geproduceerd en de CO₂-emissies die in deze ketens optreden.
- De kosten van vergaande efficiencyverbetering bij personenauto's zijn voorts nog relatief hoog. CO₂-vermijdingskosten (op basis van maatschappelijke kosten) voor reducties tot 25 - 30% zijn in de orde van 100 tot 200 €/ton. Ook op consumentenniveau verdienen de kosten van veel energiebesparende technieken zich niet volledig terug door de besparing op brandstofkosten. De toepassing op nieuwe voertuigen van systemen die de bandenspanning controleren heeft wel negatieve vermijdingskosten.
- Op lange termijn kunnen kosten van technische maatregelen aan voertuigen sterk dalen als gevolg van leereffecten, economy-of-scale en innovatie. Het is echter lastig om te voorspellen welke kostenreducties haalbaar zijn.

Bestelauto's

- Technische opties om bestelauto's zuiniger te maken zijn grotendeels dezelfde als bij personenauto's.

Vrachtwagens

- In vergelijking met personenauto's zijn over de reductieopties voor vrachtwagens relatief weinig gegevens beschikbaar.
- Omdat bij vrachtwagens brandstofverbruik altijd een belangrijk ontwerpcriterium is geweest, is het nog resterende CO₂-reductiepotentieel bij deze categorie voertuigen relatief klein (ongeveer 20%).
- Verschillende opties zijn slechts op een deel van de vloot toepasbaar. Lange voertuigen, verhoging van het toegelaten voertuiggewicht en vermindering van luchtweerstand hebben alleen effect op voertuigen voor langeafstandsvervoer. Hybride aandrijving en brandstofcellen zijn met name geschikt voor stedelijke toepassing (distributie).

Bussen

- Belangrijke technische opties voor CO₂-reductie bij bussen zijn verbetering van motorrendement, verlaging van gewicht en toepassing van hybride aandrijving (m.n. stadsbussen).
- Door het veel hogere aantal kilometers gedurende de levensduur van het voertuig zijn de CO₂-vermijdingskosten voor deze opties bij bussen lager dan bij personenauto's.

Alternatieve brandstoffen

- De alternatieve brandstoffen die in dit rapport behandeld worden zijn LPG, CNG, 1^e en 2^e generatie biobrandstoffen, waterstof en elektriciteit. Voor een vergelijking van de effecten op CO₂-emissies (en overige broeikasgassen) wordt de gehele energieketen ('well-to-wheel') in beschouwing genomen.
- De ketenemissies van LPG en CNG zijn vergelijkbaar met of iets lager dan die van diesel, en nemen toe wanneer de brandstof over grotere afstanden wordt aangevoerd. Door het lage reductiepotentieel zijn de CO₂-vermijdingskosten relatief hoog.
- 1^e generatie biobrandstoffen worden hoofdzakelijk gemaakt uit olie- of zetmeelhoudende zaden, uit suikerbieten, of uit suikerriet. Voor de productie is nog veel fossiele brandstof nodig. De well-to-wheel reductie van broeikasgassen is voor de verschillende 1^e generatie brandstoffen zeer verschillend, maar gemiddeld slechts rond de 50%.
- Er zijn processen in ontwikkeling voor 2^e generatie biobrandstoffen die worden geproduceerd uit houtachtige biomassa of plantaardig afval. Deze leveren over de hele keten CO₂-reducties van zo'n 90%.
- De belangrijkste 1^e generatie biobrandstoffen zijn op dit moment ethanol (door vergisting geproduceerd uit graan, suikerbieten en suikerriet) en biodiesel (door verestering geproduceerd uit plantaardige olie). Daarnaast is er aandacht voor ondermeer MTBE en ETBE uit bio-ethanol, biogas en 2^e generatie biobrandstoffen zoals ethanol uit lignocellulose en synthetische biodiesel (biomass-to-liquid - BTL).
- Biobrandstoffen kunnen puur worden toegepast, maar kunnen ook worden bijgemengd bij benzine (ethanol, MTBE, ETBE), diesel (biodiesel en BTL) en aardgas (biogas, waterstof).



- De CO₂-vermijdingskosten van biobrandstoffen liggen vooralsnog op enige honderden Euro's per ton. Toepassing van alternatieve brandstoffen in bijvoorbeeld elektriciteitsopwekking levert lagere CO₂-vermijdingskosten dan toepassing in voertuigen.
- De duurzaamheid van biobrandstoffen in een bredere context dient gecertificeerd te worden, waarbij ook effecten op biodiversiteit, landgebruik (bijv. kappen van tropisch regenwoud), lokale economie, arbeidsomstandigheden en concurrentie met natuur en voedsel- en veevoerproductie worden meegenomen.
- Veel studies tonen aan dat de wereldwijd beschikbare hoeveelheid land voor productie van biomassa beperkt is. Omdat inzet van biomassa voor bijv. elektriciteitsopwekking kosteneffectiever is dan inzet in de transportsector zal slechts een beperkt deel van de wereldwijd geproduceerde hoeveelheid biomassa beschikbaar zijn voor de transportsector. Voor het halen van de lange termijn reductiedoelstellingen in de transportsector is het dus ook nodig dat voertuigen significant zuiniger worden en zuiniger worden gebruikt.
- Waterstof en elektriciteit kunnen worden gemaakt uit alle vormen van primaire energie. Netto reductie van CO₂-emissies treedt op wanneer gebruik wordt gemaakt van fossiele brandstoffen in combinatie met CO₂-afvang en opslag, van kernenergie of van duurzame bronnen als biomassa, zonne- en windenergie. Voor waterstof hebben thermische productieprocessen een gunstiger rendement dan elektrolyse.
- Waterstof en elektriciteit kennen vooralsnog allebei beperkingen m.b.t.:
 - de opslag aan boord van voertuigen waardoor de actieradius van de voertuigen wordt beperkt;
 - de inrichting van een distributie-infrastructuur;
 - de prijs van voertuigen en levensduur van componenten.

Niet technische maatregelen

- Aankoopgedrag is een belangrijke determinant voor de huidige trend in de CO₂-emissie van personenauto's. De aanschaf van kleinere voertuigen of de keuze voor de zuinigste voertuigen binnen een klasse leidt tot aanzienlijke CO₂-reducties (beide 10-20%).
- Het praktijkverbruik van personenauto's kan zo'n 5% worden gereduceerd door toepassing van een energiezuinige rijstijl.
- Verbetering van doorstroming en verlaging van de rijsnelheid kunnen bijdragen aan vermindering van de CO₂-emissie van de gehele vloot.
- Volumereductie kan plaatsvinden door vermindering van de mobiliteitsbehoefte of door verbetering van de vervoersefficiëncy door dezelfde vervoersprestatie of toegevoegde waarde te leveren met minder voertuigkilometers.
- Een back-of-the-envelope analyse op basis van het GE-scenario laat zien dat voor het halen van uitdagende CO₂-reductiedoelen (bijv. 50% reductie in 2030 t.o.v. 2005) naast maatregelen op het gebied van efficiëncy en CO₂-arme of CO₂-neutrale brandstoffen in alle geval beheersing van de volumegroei noodzakelijk is. Bij conservatieve aannamen m.b.t. het potentieel van efficiëncymaatregelen en biobrandstoffen is er zelfs een netto volumereductie t.o.v. 2005 nodig.

Overige vervoerwijzen

- Bij het spoor zijn nog wel mogelijkheden voor CO₂-reductie, maar door het geringe aandeel in de totale transportemissies is de bijdrage daarvan beperkt.
- Bij vliegtuigen zijn technische maatregelen mogelijk aan nieuwe en aan bestaande vliegtuigen. Ook zijn er verschillende operationele maatregelen die significante CO₂-reductie kunnen bewerkstelligen. De belangrijkste is verbetering van air traffic management. Dit kan 8 tot 10% besparing opleveren.
- Bij scheepvaart zijn eveneens technische maatregelen mogelijk aan nieuwe en aan bestaande vaartuigen. Ook in deze sector zijn er verschillende operationele maatregelen die forse CO₂-reducties kunnen bewerkstelligen. Opties met een groot potentieel zijn vermindering van de waterweerstand, verbetering van motorrendement of toepassing van gasturbines, verbeterd onderhoud alsmede verbeteringen van de logistiek en verlaging van de vaarsnelheid.

Beleidsmaatregelen

Beleidsmaatregelen zijn nodig om gewenste ontwikkelingen m.b.t. CO₂-reductie, toepassing van nieuwe technologieën en gedragsverandering te bewerkstelligen. Er kan onderscheid worden gemaakt in generieke en specifieke beleidsmaatregelen. Specifieke maatregelen richten zich op een bepaalde techniek of toepassing. Voorbeelden zijn BPM-vrijstelling voor hybride auto's en overheidscampagnes ter bevordering van het nieuwe rijden. Generieke maatregelen stimuleren CO₂-reductie door technische of gedragsaanpassingen, maar laten actoren meer ruimte om zelf te bepalen welke optie bij hun situatie past en in die situatie het meest kosteneffectief is. Emissiehandel en CO₂-differentiatie zijn voorbeelden van generieke maatregelen.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van beleidsmaatregelen die in verschillende deelsectoren of voor de transportsector als geheel kunnen worden ingezet, en geeft aan op welke aspecten van het systeem deze maatregelen direct of indirect aangrijpen.



Tabel 28 Algemeen overzicht van beleidsinstrumenten voor reductie van CO₂-emissies en de aspecten waarop deze maatregelen direct of indirect aangrijpen

Categorie instrument	Aangrijpingspunten → Instrumenten ↓	Gedrag	Gebruik / efficiëntie	Techniek			Keus vervoer-middel	Volume
				Voertuig-techniek	Brandstoffen / energiedragers	Overige techniek		
Infrastructuur	CO ₂ in ontwerpeisen / MER voor weginfrastructuur		X					X
	investeren in OV-infrastructuur		i				X	
	verkeersmanagement	X	X				i	
	stimulering / aanleggen alternatieve energie-infrastructuur				X			
Ruimtelijke ordening	CO ₂ in ontwerpeisen / MER voor ruimtelijke plannen		i				X	X
Informatie-verschaffende voorzieningen en organisatie	ontwikkelen en verspreiden kennis over duurzame mobiliteit en efficiënte logistiek (kennisinfrastructuur)	X	X			X	X	X
	productkeuze-informatie voor consumenten en professionele gebruikers	X	X				X	
Directe regulering	CO ₂ -emissienormen voor voer-/vaar-/vliegtuigen			X	i			i
	verplicht aandeel biobrandstoffen			i	X			i
	verplichte bijmenging biobrandstoffen			i	X			i
	normen voor efficiënte componenten, bijv. banden, airco's					X		
	CO ₂ - of verbruikseisen in aanbesteding OV (bussen)			X	X			
Indirecte regulering (financieel-economische instrumenten, fysieke voorzieningen,...)	CO ₂ -differentiatie van belastingen			X	X	?	X	(X)
	km-heffing	X	X					X
	CO ₂ -differentiatie van km-heffing	X		X	X	?		(X)
	emissiehandel i.c.m. emissieplafond opgelegd aan bijv. brandstofproducenten, voertuigbezitters of vervoersbedrijven	X	X	X	X	X	X	X
	verhoging accijnzen	X	X	X	X	?	X	X
Sociale regulering: (feedback, informatie, argumenten, educatie en afspraken,...)	convenant met bijv. auto-industrie, brandstofproducenten, luchtvaartmaatschappijen, reders, etc.			X	X	X		
	energie- of CO ₂ -labelling	X		i	i	i		
	campagnes, bijv. Het Nieuwe Rijden	X	X	X	X	X	X	X
	energiezuinig rijden in rijopleiding	X	X					
Stimulering/marketing: - R&D (subsidie,...) - innovatie (subsidie, ..) - marktintroductie (subsidie, informatie,...) - marktdiffusie (subsidie, beloningen, informatie,...)	duurzaam inkopen door overheid	i		X	X	X	X	
	R&D subsidie			X	X	X		
	subsidie op praktijkproeven en demo's			X	X	X		
	tijdelijke aankoopsubsidie	X		X	X	X		
	tijdelijk belastingvoordeel voor zuinige voer-/vaar-/vliegtuigen of alternatieve brandstoffen, bijv. versnelde afschrijving van investering	X		X	X	X		

X = aspect waarop beleidsinstrument direct aangrijpt

i = aspect waarop beleidsinstrument indirect invloed heeft



Literatuur

Statistische bronnen:

CBS Statline

Online database van CBS, www.cbs.nl/statline

DGTREN

DGTREN EU Energy and Transport in figures - Statistical Pocketbook, 2006

EUROSTAT

Online database van Eurostat, www.ec.europa.eu/eurostat

IEA

Online database van IEA www.iea.org/

Overige bronnen

ABB, 2005

M. Turtiainen

Green shipping: meeting tighter environmental regulations while improving fuel efficiency

ABB Review, 3/2005

ACARE, 2002

Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE)

Strategic Research Agenda 1, part 2: The Challenge of the Environment

Brussel, 2002

ADAC, 2005

Study on the effectiveness of Directive 1999/94/EC relating to the availability of consumer information on fuel economy and CO₂ emissions in respect of the marketing of new passenger cars

Rapport voor de Europese Commissie (DG-ENV), maart 2005

AFCG, 2003

Alternative Fuels Contact Group

Interim Report, maart 2003

Ang-Olson, 2002

J. Ang-Olson, W. Schroeer

Energy efficiency strategies for freight trucking

In : Transportation Research Record 1815, pp 11-18.

Arcadis, 2006

Monitoringonderzoek Vervolgproef LZV, Resultaten van de vervolgproef met langere of langere en zwaardere voertuigcombinaties op de Nederlandse wegen
Uitgevoerd door Arcadis in opdracht van Ministerie van Verkeer & Waterstaat
Den Haag : DG Rijkswaterstaat, AVV, mei 2006

Bates, 2001

J. Bates, C. Brand, P. Davison, N. Hill
Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change, Economic Evaluation of Emissions Reductions in the Transport Sector of the EU, updated version
Culham : AEA Technology Environment, 2001

BIB, 2006

Brandstofbesparende en CO₂-reducerende technieken in de binnenvaart
Rotterdam : Bureau Innovatie Binnenvaart, 2006

CARS21 2005

CARS 21, A competitive automotive regulatory system for the 21st century, Final report, Europese Commissie, december 2005, verkrijgbaar op website:
<http://ec.europa.eu/enterprise/automotive/pagesbackground/competitiveness/cars21.htm>

CE, 2001

B.E. (Bettina) Kampman, A.F. (Andries) Hof, J.M.W. (Jos) Dings, A. (Alexander) Gijzen (allen CE), H. (Hein) van Haselen (NEI)
Hebben autobelastingen en accijnzen effect? Invloed van auto- en brandstofbelastingen op het autopark en -gebruik in 8 EU lidstaten
Delft : CE Delft, 2001

CE, 2003

H.P. (Huib) van Essen, O. (Olivier) Bello, J.M.W. (Jos) Dings (allen CE), R. (Robert) van den Brink (RIVM)
To shift or not to shift, that the question, The environmental performance of the principal modes of freight and passenger transport in the policy making context
Delft : CE Delft en RIVM, maart 2003

CE, 2004a

R.C.N. (Ron) Wit, B.E. (Bettina) Kampman and B.H (Bart) Boon (CE Delft), in co-operation with: P.F.J. (Peter) van Velthoven and E.W. (Ernst) Meijer (KNMI, Royal Netherlands Meteorological Institute), J.G.J. (Jos) Olivier (RIVM-MNP) and D.S. (David) Lee (Manchester Metropolitan University)
Climate impacts from international aviation and shipping: State-of-the-art on climatic impacts, allocation and mitigation policies
Delft: CE Delft, 2004



CE, 2004b

H.E. (Huib) van Essen, J. (Jasper) Faber, R.C.N. (Ron) Wit
Charges for barges? Preliminary study of economic incentives to reduce engine emissions from inland shipping in Europe
Delft : CE Delft, 2004

CE, 2005a

B.E. (Bettina) Kampman en B.H. (Bart) Boon
Cool cars, fancy fuels, A review of technical measures and policy options to reduce CO₂ emissions from passenger cars
Delft : CE Delft, november 2005

CE, 2005b

R.C.N. Wit, B.H. Boon, A. van Velzen (CE Delft), M. Cames, O. Deuber (Oeko-Institut), D.S. Lee (Manchester Metropolitan University)
Giving wings to emission trading. Inclusion of aviation under the European Emission Trading System (ETS): Design and impacts
Delft : CE Delft, juli 2005

CE, 2005c

B.E. (Bettina) Kampman, L.C. (Eelco) den Boer, H. (Harry) Croezen
Biofuels under Development, Analysis of currently available and future biofuels, and a comparison with biomass application in other sectors
Delft : CE Delft, juni 2005

CE, 2006a

J.P.G.N. (Jeroen) Klooster, B.E. (Bettina) Kampman
Dealing with Transport Emissions, An emission trading system for the transport sector, a viable solution?
Delft : CE Delft, maart 2006

CE, 2006b

B.E. (Bettina) Kampman, S.M. (Sander) de Bruyn, L.C. (Eelco) den Boer
Cost effectiveness of CO₂ mitigation in transport, An outlook and comparison with measures in other sectors
Delft : CE Delft, april 2006

CE, 2006c

B.E. (Bettina) Kampman, F.J. (Frans) Rooijers en J. (Jasper) Faber
Strategie voor klimaatneutrale brandstoffen
Delft : CE Delft, juli 2006

CE, 2006d

G.C. (Geert) Bergsma, B.E. (Bettina) Kampman, M.N. (Maartje) Sevenster, H.J. (Harry) Croezen
Biofuels and their global influence on land availability for agriculture and nature, A first evaluation and a proposal for further fact finding
Delft : CE Delft, to be published

CE, 2006e

L.C. (Eelco) den Boer, K. (Karen) Rensma
Hybride locs in het Rotterdamse havengebied – Een verkenning van de potentiële effecten
Delft : CE Delft, augustus 2006

CE, 2006f

J. (Jasper) Faber, B.H. (Bart) Boon (both CE), M. (Marcel) Berk, M. (Michel) den Elzen, J. (Jos) Olivier (all MNP) and D.S. (David) Lee (MMU)
Aviation and maritime transport in a post 2012 climate policy regime
Delft : CE Delft, december 2006

CE, 2007a

Green4sure; Het Groene Energieplan
F.J. (Frans) Rooijers, B.H. (Bart) Boon, J. (Jasper) Faber en vele anderen bij CE Delft, 2007 (mei), <http://www.green4sure.nl>

COM(2005) 261

Proposal for a Council Directive on passenger car related taxes
Brussel : European Commission, COM(2005) 261

COM(2005) 683

Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council on the type approval of motor vehicles with respect to emissions and on access to vehicle repair information, amending Directive 72/306/EEC and Directive .../.../EC
Brussel : European Commission, COM(2005) 683

COM(2006) 463

Implementing the Community Strategy to Reduce CO₂ Emissions from Cars: Sixth annual Communication on the effectiveness of the strategy
Brussel : European Commission, COM(2006) 463 final

COM(2006) 818

Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC so as to include aviation activities in the scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community
Brussel : European Commission, COM(2006) 818 final, December 2006

COM(2007) 18

Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 98/70/EC as regards the specification of petrol, diesel and gas-oil and the introduction of a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions from the use of road transport fuels and amending Council Directive 1999/32/EC, as regards the specification of fuel used by inland waterway vessels and repealing Directive 93/12/EEC
Brussel : European Commission, COM(2007) 18, January 2007



COM(2007) 19

Communication from the Commission to the Council and the European Parliament: Results of the review of the Community Strategy to reduce CO₂ emissions from passenger cars and light-commercial vehicles, COM(2007) 19 final, February 2007.

Concawe, 2006

Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context
CONCAWE / EUCAR / JRC, final version 2b, May 2006

Cozzi, 2006

L. (Laura) Cozzi
World Energy Outlook Energy and CO₂ Emissions Trends in the Transport Sector
London : International Energy Agency, Stern Review Team and Department for Transport, Seminar on Transport, 12 January 2006

COWI, 2002

Fiscal measures to reduce CO₂-emissions from new passenger cars: main report
COWI, 2002

Defence Science Board, 2001

The Defence Science Board Task Force on Improving Fuel Efficiency of Weapons Platforms
More Capable Warfighting through Reduced Fuel Burden
Washington, D.C., 2001

DG TREN, 2006

European energy and transport trends to 2030 - update 2005
Office for Official Publications of the European Communities, 2006

DLR, 2004

Preparation of the 2003 review of the commitment of car manufacturers to reduce CO₂-emissions from M₁ vehicles
German Aerospace Centre (DLR), 2004

DNV, 2006

Reduced emissions and improved bottom line, press announcement
DNV, 6 June 2006.

ECN, 2007

S.M. Lensink, H.P.J. de Wilde
Kostenefficiëntie van (technische) opties voor zuiniger vrachtverkeer
ECN rapportnr. ECN-E--07-003, januari 2007

Frontier, 2006

Frontier Economics 2006: Economic consideration of extending the EU ETS to include aviation: a report prepared for the European Low Fares Airline Association (ELFAA)
Londen, 2006

GAVE, 2004

R. Smokers, R. Smit (TNO)
Compatibility of pure and blended biofuels with respect to engine performance, durability and emissions, A literature Review
GAVE report 2GAVE04.01, GAVE / SenterNovem, December 2004

Goodwin, 2003

P. Goodwin, J. Dargay, M. Hanly
Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: a review
London : ESRC transport Studies Unit, University College London, 2003
(www.transport.ucl.ac.uk)

Hagler Bailly, 2000

J. Craun
Assumptions and sources used in developing inputs for the supply-side modelling exercise
Paper prepared for Stratus Consulting (2001)

Hoen, 2006

A. Hoen en G.P. Geilenkirchen
De waarde van een SUV
Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk, 2006

Hoogwijk, 2003

M. Hoogwijk, A. Faaij, R. v.d. Broek, R. Berndes, D. Gielen, W. Turkenburg
Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy
In : Biomass and Bioenergy, Volume 25, Issue 2, August 2003, Pages 119-133

HVFESEG, 2005

Final report by Heavy Vehicle Fuel Efficiency Standard Evaluation Group, Heavy Vehicle Standards Evaluation Committee, Energy Efficiency Standards Subcommittee of the Advisory Committee of Natural Resources and Energy
Japan, 2005

HyWays, 2006

HyWays, A European Roadmap, Assumptions, visions and robust conclusions from project Phase I
Rapport te downloaden van: <http://www.HyWays.de>



HyWays, 2007

Results of HyWays for Netherlands

Presentatie door M. Weeda en H. Jeeninga (ECN) op 5^e Nederlandse stakeholder meeting van het HyWays-project, Utrecht, 16 januari 2007

IATA, 2004

Guidance material and best practices for fuel and environmental management

ICAO, 2003

Operational opportunities to minimize fuel use and reduce emissions

Circular 303, 2003

IEA, 2005

Making cars more fuel efficient: Technology for Real Improvements on the Road

International Energy Agency and European Conference of Ministers of Transport

Joint Report, 2005

IEA, 2006

CO₂ emissions from fuel combustion (2006 edition)

Paris : IEA, 2006

IEEP, 2005

Service contract to carry out economic analysis and business impact assessment of CO₂ emissions reduction measures in the automotive sector, contract nr. B4-3040/2003/366487/MAR/C2, uitgevoerd door IEEP, TNO en CAIR in opdracht van Europese Commissie (DG-ENV), juni 2005

IPCC 1999

IPCC

Aviation and the global atmosphere - A special report of IPCC working groups I and III. Intergovernmental Panel on Climate Change

Cambridge : Cambridge University Press, UK, 1999

IVM 2006

F. (Frans) Oosterhuis en R. (Reyer) Gerlagh (IVM), V. (Véronique) Monier en C. (Cécile) des Abbayes (BIO), B. (Benjamin) Görlach (Ecologic), A. (Andrew) Jarvis en J. (James) Medhurst (GHK), O. (Onno) Kuik (IVM), R. (Robin) Vanner en P. (Paul) Ekins (PSI), J. (Jochem) Jantzen en H. (Henk) van der Woerd (TME), P. (Peter) Vercaemst, D. Huybrechts en E. Meynaerts (VITO), Reviewed by (IVM)

Ex-post estimate of costs to business of EU environmental legislation

Contract nr. ENV.G.1/FRA/2004/0081, by IVM, BIO, Ecologic, GHK, PSI, TME and VITO on behalf of DG-ENV, April 2006

Langer 2004

T. Langer

Energy savings through increased fuel economy for heavy-duty trucks

American council for an energy-efficient economy.

MMU, 2005

Study on the allocation of emissions from international aviation – current day
Manchester Metropolitan University
Centre for air transport and the environment (CATE)

MNP, 2006a

A. Hoen, R.M.M. van den Brink, J.A. Annema
Verkeer en vervoer in de Welvaart en Leefomgeving, Achtergronddocument bij
Emissieprognoses Verkeer en Vervoer
Den Haag : MNP Rapport 500076002/2006

MNP, 2006b

M.G.J. den Elzen, M.M. Berk, J.G.J. Olivier, J. Faber
Analysis of some options for including international aviation and marine emis-
sions in a post-2012 climate mitigation regime
MNP Report 728001034/2006

Norris and Wagner, 2005

G. Norris, Mark Wagner
Airbus A380: Superjumbo of the 21st Century
Zenith Press, 2005

Peeters, 2005

P.M. Peeters, J. Middel, A. Hoolhorst
Fuel efficiency of commercial aircraft, an overview of historical and future trends
NLR, 2005

Platts, 2007

IATA Jet Fuel Price Monitor,
http://www.iata.org/whatwedo/economics/fuel_monitor/index.htm, geraadpleegd
op 15 januari 2007.

RAND, 2003

Preparation of measures to reduce CO₂ emissions from N₁ vehicles
A report to DG Environment by RAND Europe, FKA and TML, April 2003

Ricardo, 2003

Carbon to Hydrogen' Roadmap for Passenger Cars: Update of the Study
Ricardo, 2003

RIVM/MuConsult, 2001

Stimuleren van verkoop van zuinige auto's; De effecten van drie prijsmaatregelen
op de CO₂-uitstoot van personenauto's
De Bilt : RIVM/MuConsult, 2001



Saricks, 2003

C. Saricks, A.D. Vyas, F. Stodolsky, J.D. Maples
Potential effect of future energy efficiency and emissions improving technologies on fuel consumption of heavy trucks
Presentation at the 82nd annual meeting of the transportation research board, paper no. 02-3647
Washington DC, 12-16 januari 2003

Sausen, 2005

R. (Robert) Sausen, I. (Ivar) Isaksen, V. (Volker) Grewe, D. (Didier) Hauglustaine, D.S. (David) Lee, G. (Gunnar) Myhre, M. (Marcus) O. Köhler, G. (Giovanni) Pitari, U. (Ulrich) Schumann, F. (Frode) Stordal, en C. (Christos) Zerefos
Aviation radiative forcing in 2000: and update on IPCC (1999)
In : Meteorologische Zeitschrift 114, 555 – 561, 2005

SEPA, 2005

The Top Runner Program in Japan – its effectiveness and implications for the EU, Swedish Environmental Protection Agency, Report 5515
SEPA, november 2005.

SCP, 2000

L. (Linda) Steg, N. (Nelly) Kalfs
Altijd weer die auto! Sociaal- en gedragswetenschappelijk onderzoek en het verkeers- en vervoerbeleid
Den Haag : Sociaal en Cultureel Planbureau, Adviesdienst Verkeer en Vervoer, december 2000

Smeets, 2005

E. (Edward) Smeets, A. (André) Faaij and I. (Iris) Lewandowski
The impact of sustainability criteria on the costs and potentials of bioenergy production, An exploration of the impact of the implementation of sustainability criteria on the costs and potential of bioenergy production, applied for case studies in Brazil and Ukraine
Utrecht : Copernicus Institute, Utrecht University, May 2005

SSSM, 2000

J. (Jean) Agras, H. (Heidi) Ries, K. (Keith) Parks, P. (Peter) Larsen
Revised Methodology Used in Developing the Stratus Supply Side Model
Stratus Consulting Inc., 2000

TNO, 2002

R.C. Rijkeboer, R.J. Vermeulen, N.L.J. Gense
Options to integrate the use of mobile air-conditioning systems and auxiliary heaters into the emission type approval test and the fuel consumption test for passenger cars (M1 vehicles)
TNO-report 02.OR.VM.074.1/NG, TNO Automotive, December 2002, on behalf of DG-ENV (contract nr. B4-3040/2001/326135/MAR/C1).

TNO, 2004a

R.J. Vermeulen, N.L.J. Gense, R.T.M. Smokers

The design of a measurement procedure for the determination of the additional fuel consumption of passenger cars due to the use of mobile air conditioning equipment

Carried out by TNO Automotive on behalf of DG-ENV (contract nr. B4-3040/2003/367487/MAR/C1), 2004

TNO, 2004b

Study contract on measuring and preparing reduction measures for CO₂ emissions from N₁ vehicles

Study for DG Environment carried out by TNO, IEEP and LAT/AUTh, 2004

TNO, 2006a

R. (Richard) Smokers, R. (Robin) Vermeulen, R. (Robert) van Mieghem en R. (Raymond) Gense (TNO), I. (Ian) Skinner, M. (Malcolm) Fergusson, E. (Ellie) Mackay en P. (Patrick) ten Brink (IEEP), G. (George) Fontaras en Z. (Zisis) Samaras (LAT)

Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂-emissions from passenger cars

Door TNO, IEEP en LAT in opdracht van Europese Commissie DG-ENTR (contract SI2.408212), TNO rapport 06.OR.PT.040.2/RSM, oktober 2006

TNO, 2006b

R. (Robin) Smit, R. (Richard) Smokers, E. (Eric) Schoen en A. (Amber) Hensema
A New Modelling Approach for Road Traffic Emissions: VERSIT+ LD – Background and Methodology

TNO rapport 06.OR.PT.016.1/RS, juli 2006

TU Graz, 2006

Bijdrage door S. Hausberger, TU Graz, aan project Cost-effectiveness of greenhouse gas emission reductions in various sectors, in opdracht van Europese Commissie, DG-ENTR, contractnr. Entr/05/18. Rapportage niet openbaar.

UBA, 2003

Reducing CO₂ emissions in the transport sector, A status report by the Federal Environmental Agency - A description of measures and update of potentials

Umwelt Bundes Amt, Germany, September 2003

UNCTAD, 2006

Review of maritime transport

United Nations Conference on trade and development

New York/Geneva, 2006

VTPI, 2005

Victoria Transport Policy Institute, TDM Encyclopedia, Transportation elasticities, <http://www.vtpi.org/tdm/tdm11.htm>



WLO, 2006

L.H.J.M. Janssen, V.R. Okker en J. Schuur

Welvaart en Leefomgeving, een scenariostudie voor Nederland in 2040 (hoofdrapport en achtergronddocument), Centraal Planburo, Milieu- en Natuurplanburo en Ruimtelijk Planburo, september 2006

<http://www.welvaartenleefomgeving.nl>



State-of-the-Art CO₂ en Mobiliteit

Bijlagen bij deel I & II

Rapport

Delft, juli 2007

Opgesteld door: R.T.M (Richard) Smokers
L.C. (Eelco) den Boer
J. (Jasper) Faber





A Lijst van afkortingen

BL	black liquor (tussenproduct voor synthetische brandstof)
BTL	biomass-to-liquid (Fischer-Tropsch)
CDM	Clean Development Mechanism ²⁸
CHP	combined heat and power (warmte-krachtkoppeling - wkk)
CNG	compressed natural gas
CTL	coal-to-liquid (Fischer-Tropsch)
DICI	direct injection compression ignition (DI dieselmotor)
DME	dimethylether
DPF	diesel particulate filter
ETBE	ethyl tertiair butylether
FC	fuel cell (brandstofcel)
FT	Fischer-Tropsch
GHG	greenhouse gas (broeikasgas)
GTL	gas-to-liquid (Fischer-Tropsch)
GWP	global warming potential
GVW	gross vehicle weight
HCCI	homogeneous charge compression ignition
HD	heavy duty
ICE	internal combustion engine (verbrandingsmotor)
JI	Joint Implementation ²⁹
LD	light duty
LNG	liquid natural gas
LPG	liquid petroleum gas
LRRT	low rolling resistance tyres
LTO	landing and take-off
LVL	low viscosity lubricants
LZV	lange en zware voertuigen
MTBE	methyl tertiair butylether
NEDC	new European driving cycle = testcyclus voor typekeuring
NG	natural gas (aardgas)
NGV	natural gas vehicle
NPV	Net Present Value
OEM	original equipment manufacturer
PISI	port injection spark ignition (conventionele otto-motor)
REE	rapeseed ethyl ester (biodiesel uit koolzaadolie)

²⁸ CDM-projecten hebben als doelen het stimuleren van duurzame ontwikkeling in ontwikkelingslanden en het verminderen van de uitstoot van broeikas-gassen. Deze met de projecten samenhangende uitstootvermindering wordt (gedeeltelijk) aan de investerende landen uitgekeerd in de vorm van certificaten die deze landen kunnen meetellen bij het realiseren van de eigen, binnenlandse klimaatdoelen.

²⁹ Bij JI investeert een industrieel land in een emissie-reductieproject in een ander industrieel land. M.n. in de landen van het voormalige Oostblok zijn de kosten van emissiereducties gemiddeld lager dan in westerse industrielanden.

RME	rapeseed methyl ester (biodiesel uit koolzaadolie)
SCR	selective catalytic reduction
SME	sunflower methyl ester (biodiesel uit zonnebloemolie)
SNG	substitute natural gas
TPMS	tyre pressure monitoring system(s)
TTW	Tank-to-Wheel
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel



B WLO-scenario's

Het ontwerp van de WLO-scenario's is gestoeld op twee sleutelonzekerheden:

- De bereidheid om internationaal samen te werken: de Europese Unie en mondiale samenwerking zijn belangrijk. Dit uit zich onder andere in internationaal milieubeleid en handelsliberalisatie.
- De mate van hervorming van de collectieve sector. Hierbij gaat het om de keuze tussen collectieve dan wel private goederen en diensten en om de loonongelijkheid.

Er bestaat een sterke relatie tussen de toename van de welvaart en de groei van de mobiliteit, zowel voor personen als goederen. Verbetering van de koopkracht stimuleert de aanschaf en het gebruik van een (tweede) auto, waarbij op lange termijn een afvlakking van de groei hierin plaatsvindt.

Al gedurende een lange tijd dalen in reële termen de transportkosten. Dit geldt voor alle modaliteiten. Achterliggende oorzaken zijn de grootschalige ontwikkeling van containers, sterk toegenomen snelheden en frequenties in de luchtvaart, de vorming van uitgebreide spoorwegnetwerken en de aanleg van het snelwegstelsel.

Binnen de WLO-scenario's beperkt het klimaatbeleid voor transport zich tot de uitvoering van de biobrandstoffen Richtlijn, en het ACEA-convenant. Het is anno 2006 zeer onwaarschijnlijk dat dit doel wordt gehaald. Alleen in het Strong Europe-scenario is aangenomen dat het doel wel gehaald wordt, zij het dan met enige jaren vertraging. Verder wordt aangenomen dat het aandeel biobrandstof in de totale hoeveelheid wegtransportbrandstof in alle scenario's tot 2020 2% zal bedragen. In het Strong Europe-scenario, met stringent klimaatbeleid, wordt na 2020 een aandeel van 5,75% verondersteld, conform de Europese richtlijn voor 2010.

Alle scenario's gaan uit van eenzelfde groei van de aanbodsfactoren. De lengte van het hoofdwegennet neemt toe met 23% tussen 2000 en 2020 en met 14% tussen 2020 en 2040.

<p>STRONG EUROPE</p> <p>Mondiale handel met voortgaand Europees milieubeleid, voortgaande infrastructuuruitbreidingen. Op wereldschaal werkt de EU nauw samen met andere landen(-blokken) waaronder de opkomende wereldmacht China. Daardoor zal in Strong Europe het internationale vervoer aanzienlijk toenemen. Dit komt vooral tot uitdrukking in het lange afstandsvervoer binnen Europa, maar daarnaast ook in relatie met alle andere werelddelen.</p> <p>Inwoners 2040: 18,9 mln BBP/hoofd in 2040 (200=100): 156 BBP groei per hoofd van bevolking: 2,1% Personenautobezit: 9,7 mln</p>	<p>GLOBAL ECONOMY</p> <p>Mondiale vrijhandel, huidige EU-milieunormen continueren, voortgaande infrastructuuruitbreidingen. De EU breidt zich in Global Economy nog verder naar het oosten uit. Onder invloed van de mondiale handelsliberalisatie van goederen en diensten neemt het internationale vervoer van personen en goederen fors toe.</p> <p>Inwoners 2040: 19,7 mln BBP/hoofd in 2040 (200=100): 221 BBP groei per hoofd van bevolking: 2,1% Personenautobezit: 11,8 mln</p>
<p>REGIONAL COMMUNITIES</p> <p>Handelsblokken en heffingen ter bescherming van het milieu, accent op nationaal milieubeleid, voortgaande infrastructuuruitbreidingen. Het internationale vervoer van personen en goederen ontwikkelt zich in Regional Communities in bescheiden mate, zowel in omvang als ook in mondiale spreiding.</p> <p>Inwoners 2040: 15,8 mln BBP/hoofd in 2040 (200=100): 133 BBP groei per hoofd van bevolking: 0,7% Personenautobezit: 7,7 mln</p>	<p>TRANSATLANTIC MARKET</p> <p>Handelsblokken en importheffingen ter bescherming van de nationale productie, geen sterk milieubeleid, voortgaande infrastructuuruitbreidingen. Handelsakkoorden op mondiale schaal blijven daardoor uit. Tussen Europa en de Verenigde Staten is wel sprake van vergaande handelsliberalisatie die resulteert in een nieuwe interne markt zonder handelsbarrières. Grootschalige ontwikkeling van het internationale vervoer van personen en goederen vindt daardoor vooral plaats tussen Europa en Amerika.</p> <p>Inwoners 2040: 17,1 mln BBP/hoofd in 2040 (200=100): 195 BBP groei per hoofd van bevolking: 1,7% Personenautobezit: 9,5 mln</p>



C DG TREN-scenario

Het DG TREN-scenario voor de EU-25 verschilt van de WLO-scenario's. DG TREN gaat ervan uit dat eenmaal ingezet beleid gecontinueerd wordt. Dit houdt in dat onder andere windenergie, biobrandstoffen blijvend gestimuleerd worden. De belangrijkste aannames zijn:

- voortzetting bestaand stimuleringsbeleid;
- ontkoppeling van economie en transport na 2010;
- doorwerking ACEA-convenant;
- daling energie-intensiteit met ~30% tussen 1990 en 2030;
- daling van de koolstofintensiteit van energiegebruik;
- sterke autonome technologische ontwikkeling;
- structurele verandering in de economie naar minder energie intensief;
- 2,0% economische groei per jaar;
- weinig bevolkingsgroei.

In rapportage worden de volgende punten benoemd:

The Baseline scenario assumes that agreed policies addressing economic actors in the EU-25 Member States, as known by the end of 2004, will continue. It presumes that all current policies and those in the process of being implemented at the end of 2004 will continue in the future. However, in the Baseline scenario it is not assumed that the indicative targets, as set out in various EC Directives (renewables electricity Directive 2001/77, Directive 2003/30 on renewable energy in transport and any additional follow up Directives, etc.) will be necessarily met. The numerical values for these indicators are outcomes of the modelling; they reflect implemented policies rather than targets. This approach allows the Baseline scenario to be considered as the benchmark against which a number of alternative policies can be judged, assisting policy analysts in the evaluation of alternative measures. Hence, the Baseline scenario takes into account:

- *Technological progress, induced both by economic growth and by modernisation of installations in all sectors of the economy, thereby improving the efficiency of the energy system.*
- *The restructuring of the sectoral pattern of economic growth, which gradually shifts away from traditional energy-intensive products and concentrates on high value added activities, thereby reducing energy intensity.*
- *The effects from restructuring of markets through the liberalisation of electricity and gas in the EU, which proceeds in line with EC directives; liberalisation is assumed to be fully implemented in the period to 2010.¹⁴ Completion of the internal electricity and gas markets is also assumed to take place in the new Member States.*
- *The restructuring in power and steam generation, which is enabled by mature gas-based power generation technologies that are efficient, involve low capital costs and are flexible regarding plant size, co-generation and independent power production.*

- *Changes in primary energy production patterns (especially in many new Member States), characterised by the closure of unprofitable coalmines that took place in the 1990s and which is expected to continue to some extent over the next few decades.*
- *Energy policies that aim at promoting renewable energy (wind, small hydro, solar energy, biomass and waste) and co-generation are assumed to continue, involving subsidies on capital costs and preferential electricity selling prices. Rather than imposing the indicative targets of the EC renewables electricity Directive for each Member State, the Baseline includes policy measures in view of higher renewables deployment in individual countries.*
- *Continuation of energy efficiency measures in the Member States.*
- *Ongoing infrastructure projects involving the introduction of natural gas. These are assumed to be completed in the next few years.*
- *Differences in current policies of EU-25 Member States as regards nuclear capacity, taking into account policy decisions as regards nuclear phase out in Belgium, Germany and Sweden; and plans concerning nuclear plant refurbishment/closure, as already agreed or under negotiation with the European Commission for new Member States.*
- *The effects arising from the voluntary agreement reached between the European Commission and the European automobile industry on specific CO₂ emissions from new cars (followed in 1999 by similar agreements with Korean and Japanese car manufacturers).*
- *Concerning the use of biofuels in transportation, it was assumed that all countries would follow EU rules sooner or later. The impact of blending gasoline and diesel with biofuels on final consumer prices was assumed to be negligible, since higher fuel production costs will probably be offset by tax reductions scheduled to be implemented on these fuel blends.*



D Tabellen bij deel I

Tabel 29 Reizigerskilometers in het personenvervoer, 1985-2003

	Totaal	Auto	Trein	Bus/tram/ metro	Auto	Trein	Bus/tram/ metro
	<i>Mld pkm</i>				<i>index (1985=100)</i>		
1985	121,1	107,0	7,7	6,4	100	100	100
1986	126,5	111,6	7,9	7,0	104	103	109
1987	130,0	114,0	8,9	7,1	107	116	111
1988	134,0	118,1	8,9	7,0	110	116	109
1989	136,9	121,5	9,1	6,3	114	118	98
1990	144,0	125,9	11,2	6,9	118	145	108
1991	146,0	124,5	13,3	8,2	116	173	128
1992	152,2	129,1	14,3	8,8	121	186	138
1993	148,5	126,1	13,7	8,7	118	178	136
1994	149,7	128,8	12,8	8,1	120	166	127
1995	152,4	131,4	13,0	8,0	123	169	125
1996	153,7	132,7	13,1	7,9	124	170	123
1997	158,7	136,5	14,2	8,0	128	184	125
1998	159,8	137,1	14,9	7,8	128	194	122
1999	163,8	141,3	15,0	7,5	132	195	117
2000	164,0	141,1	15,4	7,5	132	200	117
2001	164,7	141,6	15,5	7,6	132	201	119
2002	166,9	144,2	15,5	7,2	135	201	113
2003	167,2	146,1	14,5	6,6	137	188	103

Data is gebruikt in Figuur 1, Figuur 2 en Figuur 3.

Tabel 30 Transportintensiteit (tonkm/1.000 Euro BBP)

	2004	1992
EU-15	225	200
Nederland	341	331

Data is gebruikt in Figuur 4.

Tabel 31 Vervoersprestaties in het goederenvervoer, 1985-2003 (mld tonkm)

	Totaal	Binnenvaart	Wegvervoer	Railvervoer
1985	62,3	32,8	26,2	3,3
1986	64,4	33,4	27,7	3,3
1987	66,5	34,0	29,3	3,2
1988	68,6	34,5	30,8	3,2
1989	70,6	35,1	32,4	3,1
1990	72,7	35,7	33,9	3,1
1991	74,0	35,5	35,4	3,1
1992	75,3	35,3	36,9	3,1
1993	76,6	35,0	38,4	3,1
1994	77,9	34,8	40,0	3,1
1995	79,1	34,6	41,5	3,1
1996	81,8	36,3	42,2	3,2
1997	84,4	38,0	43,0	3,4
1998	88,4	40,7	43,9	3,8
1999	93,8	41,4	48,4	4,0
2000	93,3	41,3	47,5	4,5
2001	93,7	41,9	47,5	4,3
2002	91,5	40,9	46,3	4,3
2003	93,2	39,7	48,7	4,7
	<i>index (1985=100)</i>			
1985	100	100	100	100
1990	117	109	130	94
1995	127	105	158	93
1997	136	116	164	103
1998	142	124	168	115
1999	151	126	185	121
2000	150	126	181	137
2001	150	128	181	130
2002	147	125	177	131
2003	150	121	186	143

Data is gebruikt in Figuur 5, Figuur 6 en Figuur 7.

Tabel 32 Bijdrage zeevaart aan vervoersprestatie (miljard tkm)

Weg	Rail	Binnenvaart	short sea shipping	deep sea shipping
1344	241	126	969	5403

Data is gebruikt in Figuur 8.



Tabel 33 Ontwikkeling van personenvervoer in de EU-15 (1.000 mln pkm)

	Auto	Trein	Bus	Tram/metro	Totaal
1970	1.552	220	269	39	2.081
1971	1.620	223	277	39	2.159
1972	1.687	226	285	39	2.237
1973	1.755	228	293	39	2.315
1974	1.822	231	301	40	2.393
1975	1.890	234	309	40	2.472
1976	1.957	236	316	40	2.550
1977	2.025	239	324	40	2.628
1978	2.092	242	332	40	2.706
1979	2.159	244	340	40	2.784
1980	2.227	247	348	41	2.862
1981	2.316	249	351	41	2.957
1982	2.404	251	353	42	3.051
1983	2.493	253	356	43	3.145
1984	2.582	256	359	44	3.240
1985	2.670	258	361	45	3.334
1986	2.759	260	364	45	3.429
1987	2.848	262	367	46	3.523
1988	2.937	264	369	47	3.617
1989	3.025	267	372	48	3.712
1990	3.114	269	375	49	3.806
1991	3.178	277	371	49	3.875
1992	3.304	277	372	48	4.001
1993	3.336	265	372	49	4.021
1994	3.484	264	372	48	4.169
1995	3.553	272	382	48	4.254
1996	3.606	278	389	49	4.322
1997	3.664	282	391	50	4.386
1998	3.746	285	395	50	4.476
1999	3.836	294	397	52	4.580
2000	3.902	304	403	54	4.663
2001	3.972	308	407	54	4.741
2002	4.055	306	406	55	4.822
2003	4.072	304	408	56	4.840

Data is gebruikt in Figuur 9.

Tabel 34 Ontwikkeling van personenvervoer in de EU-15 (1.000 mln pkm)

	Wegvervoer	Railvervoer	Binnenvaart
1970	488	282	103
1971	512	283	103
1972	535	284	103
1973	558	285	104
1974	581	285	104
1975	604	286	104
1976	628	287	105
1977	651	288	105
1978	674	288	105
1979	697	289	106
1980	720	290	106
1981	746	286	106
1982	772	283	106
1983	797	279	106
1984	823	276	106
1985	848	272	106
1986	874	269	107
1987	900	265	107
1988	925	262	107
1989	951	258	107
1990	976	255	107
1991	1.007	234	107
1992	1.029	221	107
1993	1.032	206	105
1994	1.096	219	114
1995	1.123	222	115
1996	1.138	223	111
1997	1.175	240	119
1998	1.227	240	122
1999	1.278	237	122
2000	1.321	249	127
2001	1.346	242	126
2002	1.376	240	125
2003	1.375	241	116
2004	1.460	254	126

Data is gebruikt in Figuur 10.

Tabel 35 Totale personenmobiliteit, alle vervoerwijzen, excl. luchtreizen, per WLO-scenario (miljard pkm)

	1970	1980	1985	1990	1995	2000	2002	2020	2040
Historie	100	145	155	181	189	201	204		
RC							204	222	215
SE							204	241	265
TM							204	235	245
GE							204	251	283

Data is gebruikt in Figuur 11.



Tabel 36 Volumeontwikkeling wegverkeer in WLO GE-Scenario (vkm)

GE-Scenario WLO (vkm)						
		2000	2010	2020	2030	2040
	totaal	125.031	151.199	177.393	193.462	208.933
personenauto's	totaal	97.806	118.008	140.237	150.190	161.721
	benzine	65.866	66.985	66.794	63.787	67.267
	diesel	24.184	46.923	71.247	84.156	92.041
	LPG	7.757	4.100	2.196	2.247	2.413
bestelauto's	totaal	16.635	20.513	22.841	27.487	29.722
	benzine	1.042	270	188	225	243
	diesel	15.083	20.118	22.577	27.171	29.381
	LPG	510	124	76	91	99
vrachtauto's	totaal	6.786	8.506	10.177	11.643	13.344
vrachtauto's	totaal	3.270	4.160	5.046	5.865	6.834
	3.5-10 ton GVW	393	522	660	791	951
	10-20 ton GVW	1.365	1.821	2.306	2.798	3.398
	> 20 ton GVW	1.512	1.817	2.080	2.276	2.486
trekkers	totaal	3.515	4.346	5.131	5.778	6.510
bussen	diesel	654	693	660	663	666
speciale voertuigen	totaal	385	486	486	486	486
	benzine+LPG	34	33	34	34	34
	diesel	351	452	452	452	452
tweewielers	totaal	2.765	2.992	2.992	2.992	2.992
motorfietsen	totaal	1.755	2.070	2.070	2.070	2.070
bromfietsen	totaal	1.010	923	923	923	923

Data is gebruikt in Figuur 12.

Tabel 37 Relatieve ontwikkeling volume vervoerswijzen (WLO GE-scenario, 2000 = 100)

	2000	2010	2020	2030	2040
personenauto's	100	121	142	155	167
bestelauto's	100	121	143	154	165
vrachtauto's	100	125	150	172	197
bussen	100	106	101	101	102
tweewielers	100	108	108	108	108
railvervoer (diesel)	100	135	185	233	299
binnenvaart	100	105	111	118	129
luchtvaart (LTO)	100	119	139	139	139

Data is gebruikt in Figuur 13.

Tabel 38 Prognoses voor transport activiteit in EU-25

<i>passenger (Gpkm)</i>	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Bus	504	463	480,1	484,4	495	487,5	480,6	474,4	466,7
personenauto en motorfiets	3.529	3.857,5	4.253,1	4.580,5	5.016,6	5.408,2	5.780,7	6.090,1	6.358,6
Rail	411,9	369,4	402,7	422	446,4	462,3	478,5	493,7	505,6
Luchtvaart	166,3	212,5	296,9	369,7	451,6	535,2	616,7	686,1	749,7
scheepvaart	29,2	31,9	33,6	36,4	39,7	42,6	45,5	47,8	49,5
Totaal	4.640,8	4.934,3	5.466,4	5.893	6.449,3	6.935,8	7.402	7.792,1	8.130,1
travel per person									
	10.528	11.101	12.069	12.843	13.898	14.842	15.773	16.577	17.322
<i>freight (Gtkm)</i>	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Vrachtauto	1.034,1	1.230,4	1.486,3	1.655,9	1.891,2	2.098,8	2.311,7	2.499,5	2.657,4
Rail	461,7	358,5	374,2	386,8	402	413,8	421,4	438,9	438,9
Binnenvaart	258,1	265,4	271	278,5	289	303,2	315,6	327	335,6
Totaal	1.753,9	1.854,3	2.131,5	2.321,2	2.582,2	2.815,8	3.048,7	3.265,4	3.431,9
Tkm/1.000 Euro BBP	240	238	238	239	236	229	223	218	214

Data is gebruikt in Figuur 14 en Figuur 15.

Tabel 39 Relatieve groei passagier- en vrachtverkeer in de EU-25

<i>passenger</i>	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
bus	100	92	95	96	98	97	95	94	93
personenauto en motorfiets	100	109	121	130	142	153	164	173	180
rail	100	90	98	102	108	112	116	120	123
luchtvaart	100	128	179	222	272	322	371	413	451
scheepvaart	100	109	115	125	136	146	156	164	170
	100	106	118	127	139	149	159	168	175
<i>freight</i>									
vrachtauto	100	119	144	160	183	203	224	242	257
rail	100	78	81	84	87	90	91	95	95
binnenvaart	100	103	105	108	112	117	122	127	130

Data is gebruikt in Figuur 16.

Tabel 40 Relatieve ontwikkeling van CO₂-emissies van verkeer (1980 = 100%)

	Nederland	EU-15	Wereld	Bunkering-Nederland	Bunkering-EU-15	Bunkering-Wereld
1980	100	100	100	100	100	100
1981	102	98	117	96	98	95
1982	97	100	116	94	95	91
1983	100	101	117	89	90	88
1984	102	104	121	84	89	90
1985	101	105	123	96	97	95
1986	105	110	128	107	110	103
1987	106	115	132	105	110	104
1988	110	122	138	117	115	110
1989	116	126	142	114	117	113
1990	117	129	145	120	127	120
1991	118	131	149	124	127	123
1992	123	135	152	128	131	125
1993	125	137	153	134	136	123
1994	127	138	156	130	136	126
1995	131	139	161	134	142	130
1996	134	142	165	138	150	133
1997	135	143	168	146	161	138
1998	139	148	173	150	170	140
1999	144	151	178	155	171	148
2000	146	152	181	161	181	152
2001	148	153	181	173	181	146
2002	151	154	185	173	182	150
2003	153	155	189	164	186	153
2004	155	158	198	177	200	168

Data is gebruikt in Figuur 17.

Tabel 41 Uitstoot CO₂-emissies door verbranding per sector in Nederland (Mton)

	Energie-sector	Industrie	Transport	W.v. Weg-transport	Overige sectoren	Huishoudens	Int. scheepvaart bunkers	Int. luchtvaart bunkers
1980	49	36	22	20	46	31	30	3
1981	49	37	23	21	42	28	28	3
1982	48	32	22	21	38	26	28	3
1983	42	35	22	21	39	26	26	3
1984	45	38	23	21	40	23	24	3
1985	45	35	23	20	44	25	28	4
1986	49	35	24	21	43	23	31	4
1987	51	37	24	22	43	22	30	4
1988	56	36	25	22	39	19	34	4
1989	59	34	26	24	38	19	33	4
1990	60	34	26	25	37	19	35	4
1991	60	36	26	25	44	22	35	5
1992	62	35	28	27	41	19	36	6
1993	63	36	28	27	42	20	37	7
1994	66	36	29	28	40	19	35	7
1995	69	34	29	28	40	20	36	8
1996	71	32	30	29	46	24	36	8
1997	72	34	30	29	39	20	39	9
1998	72	33	31	30	39	19	39	10
1999	69	32	32	31	36	19	40	10
2000	68	36	33	31	37	19	42	10
2001	72	35	33	32	40	20	46	10
2002	73	35	34	32	38	18	46	10
2003	74	38	34	33	39	19	43	10
2004	75	38	35	33	38	19	47	11

Data is gebruikt in Figuur 18.



Tabel 42 Uitstoot CO₂-emissies door verbranding per sector in de EU-15 (Mton)

	Energie-sector	Industrie	Transport	W.v. weg-transport	Overige sectoren	Int. scheepvaart bunkers	Int. luchtvaart bunkers
1980	1.223	766	535	471	763	97	41
1981	1.170	719	527	467	726	95	40
1982	1.147	668	532	476	688	91	40
1983	1.120	664	541	484	674	84	41
1984	1.092	671	557	499	685	81	43
1985	1.093	669	564	507	721	88	47
1986	1.103	636	591	534	738	103	50
1987	1.113	642	614	558	723	100	53
1988	1.108	651	651	594	680	102	57
1989	1.159	648	675	618	635	102	60
1990	1.176	611	690	640	641	108	67
1991	1.195	591	703	654	682	108	68
1992	1.160	566	723	674	649	109	73
1993	1.111	547	732	684	653	112	77
1994	1.127	559	737	689	624	108	81
1995	1.156	555	743	696	633	111	85
1996	1.172	545	758	711	697	118	90
1997	1.143	556	766	719	651	128	95
1998	1.162	553	794	744	651	133	102
1999	1.150	535	810	762	632	126	110
2000	1.174	548	812	766	616	135	116
2001	1.183	556	820	774	658	139	112
2002	1.217	540	827	783	624	142	111
2003	1.256	558	831	785	655	143	115
2004	1.272	562	846	799	640	153	123

Data is gebruikt in Figuur 19.

Tabel 43 Wereldwijde uitstoot CO₂-emissies door verbranding per sector (Mton)

	Transport	Energie-sector	Industrie	Int. luchtvaart bunkers	Int. scheepvaart bunkers	Overige sectoren
1980	3.137	6.383	4.774	205	343	3.228
1981	3.670	6.364	4.636	205	316	3.173
1982	3.650	6.398	4.458	213	284	3.148
1983	3.680	6.545	4.396	215	265	3.157
1984	3.789	6.747	4.554	223	268	3.268
1985	3.864	6.931	4.539	230	291	3.355
1986	4.011	7.105	4.562	252	310	3.368
1987	4.148	7.401	4.716	267	305	3.423
1988	4.342	7.654	4.900	281	321	3.493
1989	4.461	7.995	4.888	295	321	3.426
1990	4.551	8.076	4.801	294	363	3.354
1991	4.669	8.278	4.716	291	383	3.290
1992	4.765	8.661	4.411	286	397	3.229
1993	4.803	8.799	4.325	287	385	3.275
1994	4.904	8.907	4.366	297	390	3.163
1995	5.037	9.067	4.498	308	405	3.208
1996	5.161	9.424	4.655	319	408	3.336
1997	5.278	9.676	4.549	334	424	3.213
1998	5.426	9.910	4.435	341	427	3.013
1999	5.583	9.988	4.253	354	458	3.084
2000	5.675	10.294	4.366	367	466	3.120
2001	5.693	10.481	4.398	361	439	3.163
2002	5.811	10.813	4.482	365	456	3.157
2003	5.944	11.424	4.686	370	466	3.262
2004	6.214	11.973	5.091	400	521	3.305

Data is gebruikt in Figuur 20.

Tabel 44 CO₂-emissie per sector in 2020 en 2040 (Mton)

	GE 2020	GE 2040
Huishoudens	17	18
Industrie	37	46
Transport	47	60
Land- en tuinbouw	8	7
Diensten	9	8
Energiebedrijven	94	149

Data is gebruikt in Figuur 21.



Tabel 45 CO₂-emissies totaal verkeer en wegverkeer in WLO-scenario's (Mton)

Totaal verkeer	2000	2010	2020	2030	2040
GE	41,5	48,4	56,5	63,5	71,5
SE	41,5	45,7	48,8	49,6	50,6
TM	41,5	45,9	50,8	53,8	57,0
RC	41,5	42,8	43,1	41,7	40,2

Wegverkeer	2000	2010	2020	2030	2040
GE	30,4	35,7	41,8	47,1	53,0
SE	30,4	34,1	36,3	36,6	37,0
TM	30,4	33,9	37,5	39,8	42,3
RC	30,4	31,9	32,1	31,0	29,8

Data is gebruikt in Figuur 22.

Tabel 46 CO₂-emissie in de EU-25 per sector (Mton)

	1990	2000	2010	2020	2030
Energieopwekking	1.264	1.250	1.328	1.304	1.393
Stadsverwarming	98	45	34	30	32
Nieuwe brandstoffen	0	0	0	1	2
Rest energiesector	142	145	124	113	98
Industrie	699	568	577	595	570
Huishoudens	506	452	483	495	487
Tertiare sector	274	245	262	276	282
Transport	792	970	1.075	1.116	1.093
TOTAL	3.776	3.674	3.882	3.929	3.955
EU-15	3.068	3.127	3.291	3.301	3.311
NMS-10	708	547	591	628	644

Data is gebruikt in Figuur 23.

Tabel 47 Wereldwijde CO₂-emissieprojectie (Mton)

	2000	2010	2020	2030
Energiesector	8.958	11.285	13.848	16.457
Industrie	4.230	4.888	5.513	6.079
Transport	4.814	6.010	7.449	9.024
Overige sectoren	4.638	5.270	5.917	6.600
Totaal	22.640	27.453	32.727	38.160

Data is gebruikt in Figuur 24.

Tabel 48 Energiegebruik in transport in Nederland (1.000toe)

	Weg	Spoor	Luchtvaart	Binnen- vaart	Zeevaart bunkers	Totaal
1985	6.771	136	1.239	697	8.669	17.512
1986	7.050	114	1.318	738	9.632	18.852
1987	7.214	119	1.439	546	9.435	18.753
1988	7.517	113	1.521	556	10.515	20.222
1989	7.938	116	1.553	505	10.247	20.359
1990	8.040	147	1.614	556	10.822	21.179
1991	8.055	154	1.712	624	11.079	21.624
1992	8.405	155	1.977	667	11.183	22.387
1993	8.588	154	2.157	672	11.579	23.150
1994	8.711	162	2.250	687	11.073	22.883
1995	8.949	162	2.595	697	11.209	23.612
1996	9.522	166	2.772	657	11.407	24.524
1997	9.631	167	3.003	687	12.091	25.579
1998	9.515	170	3.266	657	12.194	25.802
1999	9.535	171	3.393	667	12.598	26.364
2000	9.629	176	3.348	667	13.294	27.114
2001	10.489	177	3.254	313	14.594	28.827
2002	10.705	175	3.399	299	14.411	28.989
2003	10.881	176	3.338	277	13.451	28.123
2004	11.004	188	3.563	283	14.589	29.627

Data is gebruikt in Figuur 25.

Tabel 49 Energiegebruik wegverkeer (PJ in 2004)

Benzineauto	189
Dieselauto	70
LPG-auto	15
Vrachtauto/trekker	84
Bestelauto	66
Autobus	8
Motortweewielers	4

Data is gebruikt in Figuur 26.



Tabel 50 Totaal energiegebruik verkeer en vervoer (PJ) op NL grondgebied, GE-scenario

		2000	2010	2020	2030	2040
		100	117	136	153	173
Wegverkeer	totaal	418,6	489,6	570,8	642,4	722,9
		100	117	138	153	174
personenauto's	totaal	261,6	305,8	359,8	400,7	454,7
	benzine	184,1	183,7	180,8	180,2	200,6
	diesel	58,3	112,0	173,6	214,6	247,4
	LPG	19,1	10,1	5,5	5,9	6,7
		100	102	112	134	145
bestelauto's totaal	totaal	58,2	59,3	64,9	78,0	84,3
	benzine	3,4	0,8	0,5	0,6	0,7
	diesel	53,3	58,1	64,1	77,1	83,4
	LPG	1,5	0,4	0,2	0,2	0,3
		100	129	155	177	201
vrachtauto's + trekkers	totaal	82,4	106,0	127,9	145,6	165,9
vrachtauto's	totaal	37,6	48,3	58,8	67,8	78,2
	3.5-10 ton GVW		3,3	4,2	5,0	6,1
	10-20 ton GVW		18,4	23,6	28,7	34,9
	> 20 ton GVW		26,6	31,1	34,1	37,2
trekkers	totaal	44,8	57,6	69,1	77,8	87,7
		100	107	102	102	101
bussen	diesel	8,0	8,5	8,2	8,1	8,1
		100	127	127	126	125
tweewielers	totaal	4,2	4,7	4,7	4,7	4,7
	motorfietsen	3,3	3,9	3,9	3,9	3,9
	bromfietsen	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
		100	115	133	148	167
Overig verkeer	totaal	146	167,7	194,3	216,4	243,7
		100	97	96	97	99
binnenvaart		25,8	25,2	24,9	25,1	25,5
	passagiers	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	nationaal	5,9	5,5	5,2	5,3	5,6
	internationaal	18,4	18,1	18,1	18,3	18,4
		100	100	100	100	100
zeevisserij	totaal	11,5	8,6	7,2	7,2	7,2
		100	128	158	192	231
railvervoer (diesel)		1,5	2,1	2,8	3,5	4,5
	goederen	1,0	1,5	2,2	2,9	3,9
	personen	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
		100	156	227	227	227
mobiele werktuigen	totaal	32,8	33,8	35,3	36,2	38,0
	landbouw	19,7	18,5	17,1	16,2	15,3
	overig	13,1	15,3	18,2	20,0	22,7
		100	116	135	152	171
		564,7	657,3	765,2	858,8	966,6

Data is gebruikt in Figuur 27.

Tabel 51 CO₂-emissies wegverkeer (1980-2005, Mton)

	Wegverkeer totaal	Persoonenauto	Motor-tweewieler	Bromfiets	Bestel auto	Vracht auto	Autobus	Speciaal voertuig
1980	20,0	13,1	0,1	0,1	1,2	4,5	0,5	0,4
1981	20,2	13,3	0,1	0,1	1,2	4,5	0,5	0,4
1982	20,2	13,3	0,1	0,1	1,3	4,5	0,5	0,4
1983	20,2	13,3	0,1	0,1	1,3	4,5	0,5	0,4
1984	20,2	13,3	0,1	0,1	1,3	4,5	0,5	0,4
1985	20,9	14,0	0,1	0,1	1,4	4,5	0,5	0,4
1986	21,4	14,3	0,1	0,1	1,5	4,6	0,5	0,3
1987	22,0	14,6	0,1	0,1	1,7	4,7	0,5	0,3
1988	22,5	14,8	0,1	0,1	1,8	4,8	0,6	0,3
1989	23,1	15,1	0,1	0,1	2,0	4,9	0,6	0,3
1990	23,6	15,4	0,1	0,1	2,1	5,0	0,6	0,3
1991	24,3	15,8	0,1	0,1	2,2	5,3	0,6	0,3
1992	25,3	16,2	0,2	0,1	2,4	5,6	0,6	0,3
1993	25,2	16,2	0,2	0,1	2,6	5,3	0,6	0,2
1994	26,1	16,9	0,3	0,1	2,7	5,4	0,6	0,2
1995	26,5	17,1	0,2	0,1	2,7	5,6	0,6	0,2
1996	27,1	17,3	0,2	0,1	2,9	5,7	0,6	0,2
1997	27,3	17,4	0,2	0,1	3,2	5,7	0,5	0,3
1998	28,5	17,8	0,2	0,1	3,6	6,0	0,6	0,3
1999	29,9	18,6	0,2	0,1	4,0	6,2	0,6	0,3
2000	30,5	18,9	0,2	0,1	4,3	6,1	0,6	0,3
2001	30,9	18,9	0,2	0,1	4,5	6,2	0,6	0,3
2002	31,4	19,2	0,3	0,1	4,7	6,2	0,6	0,4
2003	32,0	19,5	0,3	0,1	4,9	6,2	0,6	0,4
2004	32,4	19,8	0,3	0,1	5,1	6,2	0,6	0,4
2005	32,7	20,1	0,3	0,1	5,0	6,2	0,6	0,4

Vrachtauto's betreft het totaal van vrachtwagens van verschillende gewichtsklassen plus trekker met opleggers.

Data is gebruikt in Figuur 28.



Tabel 52 Totale emissies verkeer en vervoer (Mton) op NL grondgebied, GE-scenario

		2000	2010	2020	2030	2040
Wegverkeer	totaal	30,4	35,7	41,7	46,9	52,8
personenauto's	totaal	18,9	22,2	26,2	29,1	33,1
	benzine	13,3	13,3	13,1	13,0	14,5
	diesel	4,3	8,2	12,7	15,7	18,1
	LPG	1,3	0,7	0,4	0,4	0,4
bestelauto's totaal	totaal	4,3	4,3	4,8	5,7	6,2
	benzine	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1
	diesel	3,9	4,3	4,7	5,7	6,1
	LPG	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
vrachtauto's + trek- kers	totaal	6,1	7,8	9,4	10,7	12,2
vrachtauto's	totaal	2,8	3,6	4,3	5,0	5,8
	3.5-10 ton GVW	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4
	10-20 ton GVW	0,0	1,4	1,7	2,1	2,6
	> 20 ton GVW	0,0	2,0	2,3	2,5	2,7
trekkers	totaal	3,3	4,2	5,1	5,7	6,5
bussen	diesel	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
tweewielers	totaal	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
motorfietsen	totaal	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
bromfietsen	totaal	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Overig verkeer	totaal	11,0	12,6	14,7	16,4	18,5
binnenvaart	totaal	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9
	passagiers	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	nationaal	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	internationaal	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
zeevisserij	totaal	0,8	0,6	0,5	0,5	0,5
railvervoer (diesel)	totaal	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
	goederen	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3
	personen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
mobiele werktuigen	totaal	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
	landbouw	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1
	overig	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7

Data is gebruikt in Figuur 29.

Tabel 53 Correlatie tussen BBP en verkeersomvang in GE- en SE-scenario (2000 = 100%)

	2000	2010	2020	2030	2040
GE-BBP	100	130	161	191	221
GE-personenauto	100	118	139	155	176
GE-vrachtauto	100	129	155	177	201
SE-BBP	100	114	128	142	156
SE-personenauto	100	114	121	116	113
SE-vrachtauto	100	118	135	144	154

Data is gebruikt in Figuur 30.

Tabel 54 CO₂-emissies verdeeld over goederen en personen

	Goederen	Personen
1990	15,4	16,7
1991	15,6	17,1
1992	15,8	17,5
1993	16,0	17,8
1994	16,2	18,1
1995	16,4	18,6
1996	17,7	19,0
1997	17,6	19,0
1998	18,6	19,5
1999	19,8	20,2
2000	19,8	20,5
2001	20,1	20,7

Data is gebruikt in Figuur 31.

Tabel 55 Energiegebruik in transport, EU-15 (1.000 toe)

	Weg	Spoor	Luchtvaart	Binnenvaart	Scheepvaartbunkers	Totaal
1985	169.507	6.996	21.098	5.051	27.957	230.609
1986	179.047	6.959	22.076	5.525	32.213	245.820
1987	185.692	6.944	23.246	5.030	31.632	252.544
1988	197.484	6.906	25.435	5.006	31.852	266.683
1989	205.382	6.832	26.815	6.076	31.840	276.945
1990	211.520	6.970	27.768	6.378	34.165	286.801
1991	214.442	7.106	27.779	6.736	33.905	289.968
1992	221.587	7.146	28.784	6.907	34.178	298.602
1993	225.964	7.291	30.131	6.885	35.082	305.353
1994	225.802	7.261	31.190	6.950	33.772	304.975
1995	228.311	7.385	32.468	6.661	34.692	309.517
1996	234.147	7.524	34.178	6.874	36.841	319.564
1997	237.861	7.592	35.978	6.531	40.007	327.969
1998	246.055	7.657	39.469	6.482	41.540	341.203
1999	251.218	7.512	42.120	6.051	39.624	346.525
2000	253.198	7.579	44.025	5.319	42.170	352.291
2001	256.731	7.495	42.527	4.903	43.491	355.147
2002	259.864	7.365	42.052	4.935	44.338	358.554
2003	260.706	7.424	43.448	5.646	44.667	361.891
2004	264.240	7.332	45.558	4.972	47.618	369.720



Tabel 56 CO₂-emissies verdeeld over goederen en personen (GE-scenario, Mton)

	Personen	Goederen
2000	20,5	20,3
2010	24,3	23,4
2020	28,9	26,9
2030	31,9	30,9
2040	35,8	34,9

Data is gebruikt in Figuur 32.

Tabel 57 Gemiddelde praktijk CO₂-emissiefactor per vervoerswijze

	personenauto	bestelauto	vrachtauto	trekker	autobus	motorfiets
1980	214	298	844	1082	923	148
1985	204	292	865	1003	873	148
1990	190	273	889	987	880	148
1991	190	263	889	988	889	146
1992	190	259	890	989	890	145
1993	190	256	861	953	888	144
1994	190	257	883	982	882	144
1995	193	258	884	982	881	143
1996	193	259	883	982	880	142
1997	190	259	882	982	878	140
1998	191	260	882	982	874	139
1999	191	260	882	982	873	138
2000	193	259	852	946	890	136
2001	191	259	853	948	892	136
2002	190	260	853	948	894	135
2003	190	260	854	948	897	136
2004	191	260	853	948	899	136
2005*	191	260	852	947	899	136

Data is gebruikt in Figuur 33.

Tabel 58 Gemiddelde CO₂-emissiefactor per vervoerswijze (g/vkm), GE-scenario

		2000	2010	2020	2030	2040
Wegverkeer	totaal	243	236	235	242	253
personenauto's	totaal	193	188	186	194	205
	benzine	202	198	196	204	216
	diesel	177	175	179	187	197
	LPG	164	163	166	174	183
bestelauto's totaal	totaal	255	212	208	208	208
	benzine	235	219	209	208	208
	diesel	259	212	208	208	208
	LPG	196	187	180	179	179
vrachtauto's + trekkers	totaal	895	918	926	922	916
vrachtauto's	totaal	848	856	859	852	843
	3.5-10 ton GVW	467	466	468	468	470
	10-20 ton GVW	740	744	754	756	757
	> 20 ton GVW	1.045	1.080	1.101	1.103	1.103
trekkers	totaal	939	977	992	993	993
bussen	diesel	895	903	906	899	889
tweewielers	totaal	109	113	113	113	113
motorfietsen	totaal	137	137	137	137	137
bromfietsen	totaal	60	60	60	60	60

Data is gebruikt in Figuur 34 en Figuur 35.

Tabel 59 Historische ontwikkeling van luchtvaart in Nederland en EU-15 (1.000 mln pkm)

	EU15	Nederland	Index-EU15	Index-NL
1990	327	29	100	100
1991	312	28	96	97
1992	361	33	111	115
1993	385	39	118	133
1994	423	42	129	146
1995	467	58	143	198
1996	525	62	161	215
1997	521	66	159	228
1998	561	69	172	236
1999	607	70	186	241
2000	662	73	203	252
2001	639	69	195	237
2002	637	69	195	238

Data is gebruikt in Figuur 36.



Tabel 60 Zeevaart in Nederland: aantal schepen en overslag, 1980-2004

	Overslag van goe- den (mln ton)				Aantal los- sende zee- schepen	
	totaal		gelost	geladen		
	mln ton	index			x 1.000	
1980	320	100	246	74	43	100
1981	320	100	245	75	42	99
1982	317	99	242	76	44	103
1983	304	95	229	75	44	102
1984	325	102	244	81	44	104
1985	328	103	250	79	45	106
1986	337	105	258	79	45	105
1987	332	104	250	83	44	103
1988	354	111	267	88	45	105
1989	364	114	274	90	45	106
1990	373	117	281	92	45	107
1991	377	118	287	91	45	107
1992	378	118	289	89	45	105
1993	365	114	277	88	42	98
1994	375	117	287	88	43	102
1995	380	119	296	84	44	102
1996	378	118	293	85	42	99
1997	402	126	313	89	42	99
1998	406	127	320	86	42	98
1999	397	124	305	92	42	100
2000	424	133	325	99	43	101
2001	424	133	326	98	42	99
2002	432	135	327	105	42	99
2003	431	135	329	102	43	102
2004	464	145	351	113	45	105

Data is gebruikt in Figuur 38.

Tabel 61 Overslag in Nederlandse zeehavens (Mton)

	RC	SE	TM	GE	Realisatie
1980					347
1990					373
2000					424
2010	430	464	502	529	
2020	417	516	598	657	
2030	395	540	661	804	
2040	379	558	719	978	

Data is gebruikt in Figuur 39.

Tabel 62 Overslag in Europese zeehavens (Mton)

	Laden	Lossen	Totaal
1970	356	1.190	1.546
1980	562	1.411	1.973
1990	769	1.383	2.151
2000	1.208	2.018	3.225
2003	1.162	2.036	3.197
2004	1.165	2.038	3.202
2005	1.170	2.058	3.228

Data is gebruikt in Figuur 40.

Tabel 63 CO₂-emissies luchtvaart per allocatiemethode (Mton)

	Nederland		EU-25	
	1990	2000	1990	2000
2a	1,0	1,6	25	35
2b	1,2	2,0	31	44
3	3,0	6,9	43	79
4		7,9		87
5	3,0	6,9	43	79
6	3,6	6,7	53	78
8	0,8	1,0	22	34

Data is gebruikt in Figuur 41 en Figuur 42.

Tabel 64 CO₂-emissies van luchtvaart per allocatiemethode (Mton)

EU-25				
	3	5	6	8
2005	82	82	78	41
2010	104	104	79	41
2015	133	133	126	64
2020	156	155	148	76
2030	256	256	243	116
2040	358	357	339	161
NL				
	3	5	6	8
2005	6,4	6,4	6,3	1,1
2010	8,2	8,1	8,0	1,4
2015	10,5	10,4	10,3	1,8
2020	12,4	12,4	12,3	2,4
2030	21,2	21,2	21,0	3,4
2040	29,8	29,7	29,5	4,7

Data is gebruikt in Figuur 43 en Figuur 44.



Tabel 65 Emissies van scheepvaart in OECD Europa volgens allocatiemethode 6 (Mton)

	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Bussiness as usual	156	158	157	172	194	222	249	274
High efficiency	156	158	157	172	185	207	228	247

Data is gebruikt in Figuur 45.

OECD Europa = België, Denemarken, Duitsland, Finland, Frankrijk, Griekenland, Hongarije, Ierland, IJsland, Italië, Luxemburg, Nederland, Noorwegen, Oostenrijk, Polen, Portugal, Slowakije, Spanje, Tsjechië, Turkije, Verenigd Koninkrijk, Zweden, Zwitserland.

Tabel 66 Emissies van vervoersmiddelen op korte en lange afstand (gCO₂eq./pkm)

		Gemiddeld	Best	Worst
Korte afstand	personenauto			
	personenauto-benzine	175	224	273
	personenauto-diesel	138	176	215
	personenauto-LPG	146	187	228
	brommer	53	62	72
	stadsbus	85	114	144
	tram	51	65	79
	metro	48	60	72
Lange afstand	personenauto-benzine	69	82	94
	personenauto-diesel	61	72	83
	personenauto-LPG	55	65	75
	bus	19	35	51
	intercity-trein	29	54	79
	HST	65	99	133
	vliegtuig 500 km	445	577	709
	vliegtuig 1.500 km	216	281	346

Data is gebruikt in Figuur 48 en Figuur 49.

Tabel 67 Emissies van vervoersmiddelen op korte en lange afstand (gCO₂eq./pkm) BULK

	Best	Gemiddeld	Worst
vrachtauto > 20 ton	58	68	78
trekker-oplegger	58	68	78
trein - elektrisch	19	25	32
trein - diesel	26	34	42
binnenschip < 250 ton	105	133	161
binnenschip 250 - 400 ton	46	59	72
binnenschip 400 - 650 ton	42	54	66
binnenschip 650 - 1.000 ton	36	46	57
binnenschip 1.000 - 1.500 ton	32	42	52
binnenschip 1.500 - 3.000 ton	32	42	52
binnenschip > 3.000 ton	10	14	19
Bulkschip OB1	4	9	14
Bulkschip OB2	1	5	9
Tankschip OC1	12	19	26
Tankschip OC2	2	6	11

Data is gebruikt in Figuur 50.



Tabel 68 Emissies van vervoersmiddelen op korte en lange afstand (gCO₂eq./pkm) NON-BULK

	Best	Gemiddeld	Worst
vrachtauto < 3.5 tonnes	560	659	758
vrachtauto 3.5 - 10 tonnes	196	231	266
vrachtauto 10 - 20 tonnes	105	123	141
vrachtauto > 20 tonnes	59	69	80
trekker-oplegger	60	71	81
trein elektrisch	29	42	55
trein - diesel	39	55	70
binnenschip < 250 ton	163	209	255
binnenschip 250 - 400 ton	71	94	117
binnenschip 400 - 650 ton	64	86	108
binnenschip 650 - 1.000 ton	66	88	110
binnenschip 1.000 - 1.500 ton	85	112	139
binnenschip 1.500 - 3.000 ton	78	104	129
binnenschip > 3.000 ton	34	48	62
containerschip C1	21	34	47
containerschip C2	17	29	41
Aircraft			
vliegtuig 500 km	2.091	2.602	3.112
vliegtuig 1.500 km	1.585	1.972	2.359
vliegtuig 6.000 km	1.395	1.736	2.076

Data is gebruikt in Figuur 51 en Figuur 52.



E Methodologische aspecten van de beoordeling van opties voor CO₂-reductie

E.1 Reductiepotentiël en vermijdingskosten

Maatregelen kunnen kwantitatief worden vergeleken op basis van reductiepotentiël en vermijdingskosten (in Euro's per ton vermeden broeikasgasemissies uitgedrukt in €/tonCO₂-equiv.). Het reductiepotentiël wordt uitgedrukt in kton of Mton per jaar en is afhankelijk van het gebied waarop de maatregel wordt toegepast (bijv. NL, EU-15 of EU-25) en de penetratie van een techniek in de vloot.

Vermijdingskosten kunnen per techniek worden uitgerekend of voor een compleet pakket maatregelen als onderdeel van een scenarioberekening. In het eerste geval kan de berekening als volgt in formulevorm worden samengevat:

$$\text{CO}_2\text{-vermijdingskosten} = \frac{I^{an} + \Delta_{O\&M} - \Delta_{\text{brandstofkosten}} - \text{secundaire voordelen}}{\text{jaarlijkse CO}_2\text{-emissiereductie}} \quad (1)$$

met $\Delta_{O\&M}$ de additionele gebruiks- en onderhoudskosten (operation & maintenance) per jaar, $\Delta_{\text{brandstofkosten}}$ de jaarlijkse besparing op brandstofkosten (a.g.v. bijv. zuiniger maken van voertuig). Verder worden in bovenstaande formule ook gemonetariseerde secundaire voordelen meegenomen (bijv. vermindering van luchtverontreinigende emissies door toepassing zuinige technologie). De additionele gebruiks- en onderhoudskosten en de secundaire voordelen zijn voor transporttechnologieën overigens in de regel verwaarloosbaar. I^{an} in formule (1) is de annuïteit van de totale investeringskosten:

$$I^{an} = I * \frac{(1+r)^l * r}{(1+r)^l - 1} \quad (2)$$

In deze vergelijking l de levensduur van de maatregel, r de discontovoet (in de regel 4% voor berekening van maatschappelijke kosten) en I is de totale investering. Een alternatieve formule, die in de literatuur ook gebruikt wordt (ondermeer in de voor dit rapport relevante bron (TNO, 2006a)), is:

$$\text{CO}_2\text{-vermijdingskosten} = \frac{I - \text{NPV (brandstofbesparing over levensduur)}}{\text{CO}_2\text{-emissiereductie over levensduur}} \quad (3)$$

Hierin wordt de totale besparing op brandstofkosten over de levensduur van de optie omgerekend naar een huidige waarde (net present value, NPV) die kan worden afgetrokken van de investering die gedaan wordt bij aankoop van de optie. De uitkomsten van formule (1) en (3) verschillen enige tientallen procenten afhankelijk van de gebruikte levensduur en rentevoet.

Behalve berekeningen op voertuigniveau zoals hierboven beschreven, kunnen met modellen, die het totale transportsysteem of voertuigpark beschrijven, scenarioberekeningen worden gemaakt van individuele opties of pakketten van maatregelen. In deze modellen kan dan op basis van de veranderingen in totale kosten en totale CO₂-emissies een berekening worden gemaakt van de CO₂-vermijdingskosten. In deze modellen kan ook rekening worden gehouden met de effecten van veranderingen in de kosten van voertuigen en brandstoffen op het bezit en gebruik van voertuigen en het gebruik van andere transportmodaliteiten. Wanneer dure CO₂-reductiemaatregelen leiden tot minder mobiliteit dan zijn de met deze modellen berekende vermijdingskosten lager dan die welke op voertuigniveau worden berekend uitgaande van ongewijzigd gedrag m.b.t. aanschaf en gebruik van voertuigen.

E.2 Ontwikkeling van kosten op langere termijn: leercurves

De berekeningen van kosten en kosteneffectiviteit van verschillende CO₂-reductieopties zoals beschreven in dit rapport zijn gebaseerd op kostendata die geldig zijn voor de periode tussen nu en 2015. Het valt echter te verwachten dat veel van de genoemde technieken in de toekomst significant goedkoper kunnen worden. M.b.v. de theorie van leercurves kan worden geschat hoe de kosten van een product door afnemen als functie van de cumulatieve productie. De formule voor leercurves ziet er als volgt uit:

$$K_n = K_1 * n^{\ln S / \ln 2}$$

Hierin is:

K_1	kosten van eerste product
K_n	kosten van het n-de product
n	de cumulatieve productie
S	de 'learning rate' of 'progress ratio'

Grafisch is de formule weergegeven in onderstaande grafiek.

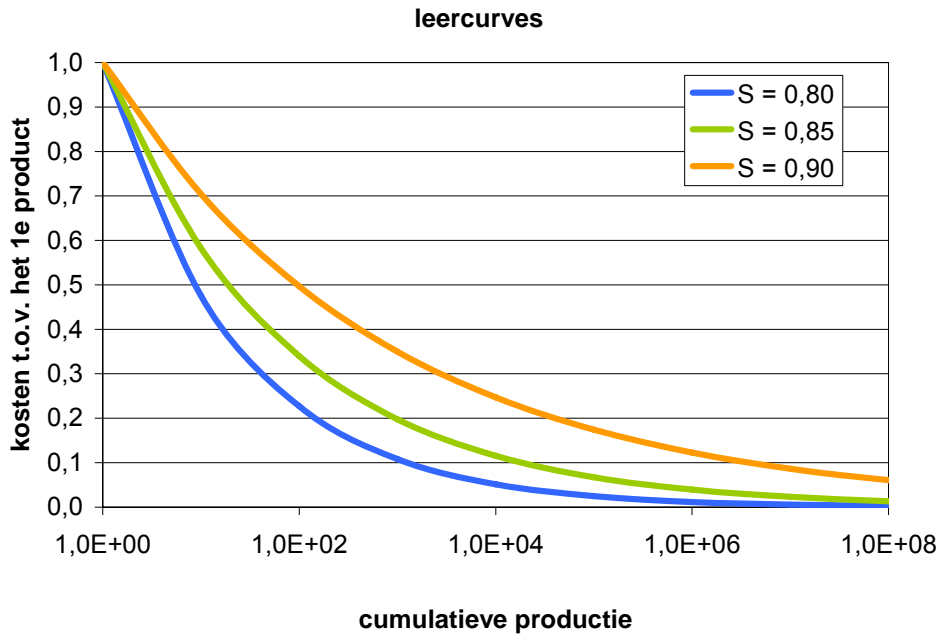
Gegeven een waarde voor S , kan de formule worden geijkt (bepaling van de waarde van K_1) op basis van informatie over de huidige kosten en cumulatieve productie van een bepaalde techniek. Voorspellingen van de toekomstige kosten vereisen voorts een inschatting van de toekomstige cumulatieve productie. Deze kan worden geschat op basis van inschattingen of voorspellingen van het verloop marktaandeel van een techniek als functie van de tijd.

Dit is echter een zeer 'zachte' wetenschap, vooral door gebrek aan inzicht in de waarde van de 'learning rate' voor specifieke producten. De variabele S dient bepaald te worden uit analyse van historische prijzen. Dat is bij nieuwe technieken vaak niet mogelijk. Ook is het niet vanzelfsprekend mogelijk om waarden over te nemen die voor vergelijkbare technieken in andere sectoren zijn bepaald. Een ander probleem is wat de entiteit is waarop de learning curve moet worden toegepast. Gaat het om een techniek in het algemeen, bijvoorbeeld hybride auto's of



een elektromotoren van een bepaald type, of gaat het om een concreet product, dus een hybride auto c.q. elektromotor van een bepaald merk/model.

Figuur 92 Leercurves voor verschillende waarden van de 'progress ratio' S



Zoals ook te zien is in de informatie over het HyWays project in Bijlage H, liggen learning rates in de regel tussen 0,8 en 1. Ervan uitgaande dat ze toe te passen zijn op een complete productcategorie is het volgende sommetje te maken om gevoel te krijgen voor het effect van leercurves.

Op dit moment zijn er zo'n 500.000 hybride voertuigen in de wereld geproduceerd en bedragen de meerkosten rond de € 4.000. Bij een learning rate van 0,8 zijn deze kosten gehalveerd bij een cumulatieve productie van 5.000.000. Bij een learning rate van 0,9 moeten er echter 10 keer zoveel hybrides (50.000.000) geproduceerd worden om tot dezelfde kostenreductie te komen. Het is dus zeker dat kosten van veel nieuwe technieken de komende decennia sterk kunnen dalen, maar moeilijk te voorspellen hoeveel ze zullen dalen.

E.3 Van typekeuring naar 'real-world', 'well-to-wheel' en CO₂-equivalenten

Bij de berekening van brandstofbesparing en CO₂-emissiereductie dient uitgegaan te worden van het werkelijk ('real world') brandstofverbruik en niet van de waarden gemeten op de typekeuringstest. In (TNO, 2006a) wordt een factor 1.195 gehanteerd voor de vertaling van verbruik en CO₂-emissie op de typekeuring naar praktijkwaarden. In deze factor zitten effecten van rijden over verschillende wegtypen en bijbehorende rijpatronen, rijstijl, en gebruik van airco.

Behalve CO₂ zijn ook andere broeikasgassen potentieel van belang. Dit geldt voor uitlaatgassen, maar met name ook voor de emissies in de energieketen. Als het gaat om uitlaatgassen dan betreft dit m.n. CH₄ en N₂O. Ondanks de hoge global warming potential (GWP) van 23 voor CH₄ en 296 voor N₂O is de bijdrage van deze stoffen aan de totale broeikasgasemissies uit de uitlaat zeer beperkt. Dit is niet het geval bij bijvoorbeeld de productie van biobrandstoffen of winning en transport van aardgas. In studies als [Concawe 2006] worden broeikasgasemissies over de totale keten berekend en m.b.v. de GWP uitgedrukt in CO₂-equivalenten. Voorts dragen ook emissies van koelmiddelen uit airco's (HFKs) bij aan de totale broeikasgasemissies van transport.

Bij de berekening van CO₂-emissiereductie dient voorts in beschouwing genomen te worden dat energiebesparing in het voertuig ook leidt tot een reductie van energiegebruik en CO₂-emissies in de productieketen van brandstoffen. In Tabel 69 zijn indicatieve factoren gegeven om de directe, Tank-to-Wheel, CO₂-emissies van voertuigen om te rekenen naar de totale, Well-to-Wheel, ketenemissies.

Tabel 69 Data over well-to-wheel broeikasgasemissies van de energieketens voor benzine en diesel (overgenomen uit (TNO, 2006a), data op basis van (Concawe, 2006))

	TTW		WTT			WTW
	CO ₂ -content [gCO ₂ /MJ_fuel]	lower heating value (LHV) [MJ/l_fuel]	WTT energy consumption [MJ/MJ_fuel]	WTT CO ₂ -emission [gCO ₂ /MJ_fuel]	WTT CO ₂ -emission [gCO ₂ /gCO ₂ _TTW]	WTW CO ₂ -emission [gCO ₂ /gCO ₂ _TTW]
petrol	73.40	32.2	0.14	12.5	0.170	1.170
diesel	72.80	35.8	0.16	14.2	0.195	1.195

E.4 Overwegingen m.b.t. berekening van vermijdingskosten

Stapelning van CO₂-reducerende opties

Voor de berekening van CO₂-vermijdingskosten van een maatregel dient een referentiesituatie of baseline voertuig te worden gekozen waarop de maatregel wordt toegepast op. Een belangrijk kenmerk van de transportsector is dat verschillende reductieopties op dezelfde CO₂-emittent worden toegepast, waardoor reductiepotentiëlen en vermijdingskosten niet onafhankelijk voor verschillende opties kunnen worden berekend. In plaats daarvan is een marginale benadering noodzakelijk waarin opties worden 'gestapeld' en steeds voor een volgende optie de absolute CO₂-emissiereductie en de marginale CO₂-vermijdingskosten worden berekend. De absolute CO₂-emissiereductie en daarmee ook de marginale CO₂-vermijdingskosten van een optie hangen immers af van de mate waarin reeds andere CO₂-reducerende opties op het baselinevoertuig zijn toegepast. De volgorde waarin opties worden gestapeld bepaalt daarmee ook de waarde van de CO₂-emissiereductie en de marginale CO₂-vermijdingskosten. Opties kunnen



worden vergeleken door ze één voor één op het referentievoertuig toe te passen en per optie de CO₂-emissiereductie en CO₂-vermijdingskosten ten opzichte van het referentievoertuig te berekenen. Dit levert echter hogere reductiepotentiëlen en lagere vermijdingskosten dan wanneer de opties gestapeld worden en dus de *n*-de optie, bij verondersteld gelijkblijvend relatief reductiepotentieel en gelijkblijvende absolute kosten, wordt toegepast op een voertuig dat al veel zuiniger is dan het baselinevoertuig door toepassing van de voorgaande *n* - 1 reductiemaatregelen.

Vanuit macro-economisch perspectief kan een gegeven reductiedoelstelling het meest kostenoptimaal worden bereikt door stapeling van opties met oplopende CO₂-vermijdingskosten. Deze aanpak is echter niet recht-toe-recht-aan toe te passen in het geval van voertuigen. Voor een niet-technische optie als 'energiezuinige rijstijl' geldt dat deze wordt toegepast op een voertuig waarop een aantal technische reductieopties zijn toegepast. Hoe zuiniger het voertuig, hoe kleiner het potentieel en hoe hoger de vermijdingskosten van de optie 'zuinig rijden' (energiezuinige rijstijl). Voor een correcte berekening van reductiepotentieel en CO₂-vermijdingskosten dient deze optie dus altijd gestapeld te worden bovenop de technische opties die worden toegepast, ondanks dat de vermijdingskosten van de optie 'zuinig rijden' in de regel lager zijn dan die van technische reductieopties. Ook voor een optie als biobrandstoffen geldt dat bij een verondersteld bijmengpercentage het totale reductiepotentieel afhangt van het gemiddeld brandstofverbruik van de voertuigen waarin de biobrandstof wordt toegepast.

Deze aspecten maken het lastig om voor de transportsector een formeel correcte generieke kostencurve te creëren. In berekeningen, waarvan verderop in dit rapport de resultaten worden samengevat, hebben we ervoor gekozen om opties als 'zuinig rijden', bijmenging van biobrandstoffen en bijv. verbetering van transportlogistiek toe te passen op voertuigen waarop alle beschikbare technische opties zijn toegepast. Wanneer de voor de transportsector benodigde reductie niet de toepassing van alle beschikbare opties vereist leidt dit tot een onderschatting van het potentieel van opties als 'energiezuinige rijstijl', bijmenging van biobrandstoffen en verbetering van transportlogistiek en tot een overschatting van de vermijdingskosten. Voor de technische opties is wel verondersteld dat ze worden toegepast in volgorde van oplopende vermijdingskosten.

Gevoeligheid voor variatie van inputgegevens

Het begrip vermijdingskosten lijkt een aantrekkelijke variabele om de effectiviteit van verschillende CO₂-reducerende opties te vergelijken. Enige voorzichtigheid bij het gebruik ervan is echter geboden. De berekening van vermijdingskosten (zie formule (1) en (3)) bevat in de teller een verschil van twee getallen (investering en vermeden brandstofkosten) die vaak van de zelfde orde grootte zijn. Het verschil van twee bijna even grote getallen is zeer gevoelig voor kleine variaties in de grootte van deze getallen. Wanneer investering en vermeden brandstofkosten 10% van elkaar verschillen, leidt een variatie in een van beide getallen met 10% tot een variatie in de berekende vermijdingskosten van 100%! De formule voor berekening van vermijdingskosten werkt in dat geval dus als een hefboom voor variaties in de inputdata. In (TNO, 2006a) is aangetoond dat dit probleem

nadrukkelijk speelt bij de berekening van de vermijdingskosten van maatregelen om personenauto's zuiniger te maken, met name in scenario's met een hoge olieprijs. Het inschatten van de kosten van toekomstige technologie met een nauwkeurigheid beter dan $\pm 10\%$ lijkt overigens, zeker in het geval van voertuig-technologie waar innovatie, leereffecten en economies-of-scale een grote rol spelen, niet mogelijk.

Belastingen

Een ander aspect betreft de vraag welke kostenaspecten wel of niet in de berekening van vermijdingskosten moeten worden meegenomen. In principe worden CO₂-vermijdingskosten berekend op basis van een definitie van maatschappelijke kosten. Daarin worden belastingen niet als reële kosten meegenomen. Er wordt gerekend met kosten excl. belastingen. In het geval van wegvoertuigen betekent dit dat BTW, BPM, wegenbelasting en brandstofaccijns buiten beschouwing worden gelaten. Een impliciete aanname is dat de overheid in de toekomst evt. effecten van genomen (technische en niet-technische) maatregelen op belastinginkomsten zodanig compenseert dat de overheidsinkomsten gelijk blijven.

Bij de berekening van de kosteneffectiviteit van overheidsmaatregelen, zeker voor de korte of middellange termijn, worden effecten op belastinginkomsten in de regel wel als kosten of baten in de berekening meegenomen.

Wanneer belastingen wel worden meegenomen in formule (1) of (3) worden vermijdingskosten op het niveau van consumenten berekend. De teller geeft dan de economische kosten-effectiviteit voor de consument weer. Doordat er op brandstof relatief meer belasting (accijns en BTW) wordt geheven dan op voertuigen (BPM en BTW) kunnen CO₂-reductiemaatregelen die op maatschappelijk niveau positieve vermijdingskosten hebben op consumentenniveau toch kosteneffectief zijn.

Welvaartskosten

Een ander potentieel belangrijk kostenconcept is dat van 'welvaartskosten'. De meest kosteneffectieve maatregel volgens formule (1) of (3) is het kopen van een kleinere auto. Deze is én zuiniger én goedkoper en heeft dus negatieve vermijdingskosten volgens formule (1) of (3). Consumenten hechten echter waarde (of 'nut') aan mobiliteit en aan comfort, prestaties, status en andere aspecten van hun vervoermiddel en zijn bereid daarvoor te betalen ('consumenten surplus'). Wanneer een maatregel de bewegingsvrijheid van consumenten inperkt, de gebruiksmogelijkheden van voertuigen beperkt of anderszins de toegevoegde waarde die de consument aan het voertuig toekent vermindert, dan levert dat een daling van de welvaart die uitgedrukt als welvaartskosten in de berekening van CO₂-vermijdingskosten kan worden meegenomen.

Het omgekeerde is overigens ook van toepassing. Wanneer een nieuwe techniek als hybride aandrijving behalve voor verbetering van efficiency ook toegepast kan worden om een 'betere' auto te maken dan kan een deel van de meerkosten worden toegewezen aan de toegenomen toegevoegde waarde. In dat geval hoeft



in formule (1) of (3) slechts een deel van de meerkosten van de aandrijving te worden toegewezen aan CO₂-reductie.

Een probleem van genoemde 'welvaartskosten' is dat ze voor een groot deel gerelateerd zijn aan gepercipieerde toegevoegde waarde en maar voor een klein deel aan praktisch aanwijsbare of ook in de praktijk door consumenten gebruikte voordelen. Toegevoegde waarde heeft dus te maken met verwachtingspatronen ten aanzien van de auto en die verwachtingen zijn weliswaar sterk maar niet voor eeuwig onwrikbaar. Ze zijn tenslotte ook het product van meer dan een eeuw marketing, reclame en praktische ervaring met steeds verder verbeterde auto's. Zoals nu reeds een groep early adopters bereid is meer te betalen voor een schone of zuinige auto (of zelfs alleen maar voor een auto die dat imago heeft), kan op de lange termijn door gerichte marketing vanuit overheid en industrie de consumentenattitude weldegelijk beïnvloed worden en kan in principe ook aan schoon, stil en zuinig toegevoegde waarde worden toegekend.

Energiezekerheid

De methodiek van vergelijking van opties op basis van CO₂-vermijdingskosten focust op CO₂-reductie als uiteindelijk doel van de maatregelen. Het vermeden gebruik van fossiele brandstoffen wordt middels de brandstofkosten wel verrekend in de baten. Energiezekerheid en vermindering van de afhankelijkheid van geïmporteerde olie heeft echter meer aspecten dan alleen de kosten/baten van vermeden brandstofverbruik. Veranderingen in de olieprijs hebben meer economische effecten dan alleen de toe- of afgenomen brandstofkosten. Er bestaat echter nog geen methodiek om deze effecten mee te nemen in een vergelijking van energiebesparende opties en ze onder een noemer te brengen met de vermeden CO₂-emissies.

Vergelijking van data uit verschillende bronnen

Verschillende studies waarin wordt gerekend aan CO₂-vermijdingskosten gaan op verschillende manieren om met bovengenoemde en andere methodologische aspecten. Ook worden berekeningen gemaakt voor verschillende aannames met betrekking tot bijvoorbeeld olieprijs, wisselkoersen en discontovoet. Een belangrijke conclusie uit (CE, 2006b) en (IVM, 2006) is dat deze verschillen het heel moeilijk maken om de resultaten van verschillende studies met elkaar te vergelijken. Dit geldt zowel voor vergelijking van studies op het gebied van CO₂-reductie in de transportsector als voor de vergelijking van studies die vermijdingskosten voor CO₂-reductie in verschillende sectoren berekenen.

'Ex ante' vs. 'ex post' schatting van kosten

'Voorspellen is moeilijk, vooral als het de toekomst betreft'. Dat geldt zeker voor kosten. Voor het afwegen van beleidsopties zijn kostenschattingen noodzakelijk, maar de ervaring heeft geleerd dat vooraf ('ex ante') ingeschatte kosten sterk af kunnen wijken van de achteraf gerealiseerde ('ex post') kosten. Infrastructurele projecten vallen vaak duurder uit dan vooraf ingeschat, terwijl bijvoorbeeld technische maatregelen ter vermindering van emissies in de regel uiteindelijk goedkoper worden gerealiseerd dan vooraf ingeschat. Een belangrijke oorzaak van dat laatste ligt in het feit dat het moeilijk is om impact van vergroting van produc-

tieschaal, leereffecten en innovatie m.b.t. product en productiemethoden van tevoren goed in te schatten. In (IVM, 2006) wordt aan de hand van een aantal historische cases een vergelijking gemaakt van ex-ante en ex-post kosten en wordt aangetoond dat de werkelijke kosten in het geval van voertuigerelateerde maatregelen m.b.t. luchtverontreinigende emissies in de praktijk soms een factor 2 tot 6 lager zijn uitgevallen dan van tevoren ingeschat.

Voor het inschatten van schaal- en leereffecten bestaan wel theoretische modellen maar de concrete toepassing daarvan vereist inschatting van bepaalde parameters voor de specifieke toepassing waarvoor in de regel de benodigde data ontbreken. De effecten van nog niet voorziene innovaties in product of productiewijze zijn per definitie niet in te schatten. Een algemene conclusie is echter wel dat in het geval van milieumaatregelen de werkelijke kosten van nieuwe technologie in de regel worden overschat bij ex-ante analyses op basis van beschikbare data en inzichten.

E.5 'Measurability', 'monitorability' en 'accountability'

Naast economische rentabiliteit en milieutechnische kosteneffectiviteit zijn er andere belangrijke aspecten waarop CO₂-besparingsopties kunnen en moeten worden beoordeeld. Praktische uitvoerbaarheid is daar een voorbeeld van. Daarbij gaat het niet alleen om politieke en maatschappelijke acceptatie, maar ook om de aspecten 'measurability', 'monitorability' en 'accountability' (CARS21, 2005). Maatregelen dienen te leiden tot effecten die objectief meetbaar of berekenbaar zijn en stakeholders dienen verantwoordelijk gesteld te kunnen worden voor en aangesproken op het al dan niet halen van gestelde doelen. Met name voor gedragsgerelateerde maatregelen, maar ook voor sommige technische maatregelen, is dit niet altijd goed mogelijk.



F Reductie-opties bij vrachtverkeer volgens ECN (2007)

Onderstaande tabel is overgenomen uit (ECN, 2007), waarin op basis van een aantal Amerikaanse studies en één Europese studie³⁰ een overzicht wordt geschetst van reductiepotentiëlen en kosten voor de in hoofdstuk 11 beschreven opties.

³⁰ Ang-Olson, 2002; Bates, 2001; Langer, 2004; Saricks, 2003.

Tabel 70 Reductieopties voor vrachtverkeer op de weg, inclusief (verwacht) introductiejaar van de technologie en de installatiekosten in €

		Class 7+8 (>12 ton)			Class 4-6 (ca. 7-12 ton)			Class 2B-3 (tot 7 ton)		
		% reductie	Introjaar	Kosten (€)	% reductie	Introjaar	Kosten (€)	% reductie	Introjaar	Kosten (€)
Aërodynamica	Aërodynamisch profiel van een truck/voorkant vrachtwagen	1.2 tot 3.5	2005	550	2.5	<2005	550	-	-	-
	Aërodynamische bumpers, stroomlijning overgang truck en trailer, wieloppoorten	1.3 tot 3.6	2005	1150	4.0	2004	600	2.5	2004	450
	Beter profiel van de hoeken van trailers en vrachtwagens	1.3 tot 3.8	2005	400	1.0	2005	300	-	-	-
	Pneumatisch beïnvloeden van de luchtstroming	5.0	2010	1900	-	-	-	-	-	-
Rolweerstand	Banden met een lage rolweerstand	3.0 tot 3.8	2005	400	2.5	2005	200	205.0	2005	150
	Automatisch bandenspanningsysteem	0.6								
	Brede banden	2.6	2008	0 tot 550	-	-	-	-	-	-
	Pneumatisch beïnvloeden van de luchtstroming	1.2	2015	400	-	-	-	-	-	-
Transmissie	Transmissie met minder slipverlies, elektronische controls en mindere weerstand	2.0	2005	1550	2.0	2005	700	2.0	2005	550
	Verminderde interne weerstand door betere smeermiddelen en verbeterde lagers	2.0	2005	400	-	-	-	-	-	-
Motor	Lage-weerstand motorolie	1.5								
	Lage-weerstand smeerolie	1.5								
	Vermindering stationair draaien: directe verwarming van de cabine (standkachel)	4.3								
	Vermindering stationair draaien: extra verbrandingsmotor voor warmte/elektr APU	8.1								
	Vermindering stationair draaien: automatische motor-aan/uitschakelaar	5.6								
	Grotere maximale cilinderdruk	4.0	2006	750	-	-	-	-	-	-
	Betere brandstofinjectie en efficiëntere verbranding	6.0	2007	1150	-	-	-	-	-	-
	Motor met lagere weerstand, betere injectoren en efficiënte verbranding	-	-	-	8.0	2008	1550	10.0	2012	1550
	Betere warmtehuishouding en vermindering van warmteverlies via de uitlaat	10.0	2010	1550	-	-	-	-	-	-
	Turbo inlaatlucht compressie, directe brandstof injectie, met betere warmtehuishouding	-	-	-	8.0	2004	750	5.0	2003	550
	Geïntegreerde startmotor/dynamo; stationair motor uit; gedeeltelijk regeneratief remmen (remmen op de dynamo)	-	-	-	5.0	2005	900	5.0	2005	900
	Hybride aandrijflijn (combinatie van kleinere brandstofmotor en elektromotor m.n. voor aanvullend transiënt vermogen)	-	-	-	40.0	2010	6150	40.0	2010	4600
	Voertuiggewicht	Gewichtsvermindering door toepassing van sterke lichtgewichtmaterialen.	0.4 tot 10	2005	1550	5.0	2007	1550	5.0	2010
Hulpmiddelen en accessoires ³¹	Minder elektriciteitsverbruik (airco, hydraulische pomp, ventilator voor radiator)	1.5	2005	400	-	-	-	-	-	-
	Elektriciteit voor o.a. airco, ventilatie en radiatorventilator uit een brandstofcelsysteem (met waterstofopwekking op de motorbrandstof)	6.0	2012	1150	-	-	-	-	-	-

Bronnen: Ang-Olson, 2002; Bates, 2001 (Saricks, 2003; Langer, 2004).

³¹ Niet CO₂-broeikasgassen komen ook vrij bij airconditioning of gekoeld transport. Voor lekkagereductieopties, zie (Bates, 2001) Appendix 2.

G Samenvatting van de Japanse 'Top Runner' programma voor HD-voertuigen

In het kader van het 'Top Runner' programma zijn er in Japan brandstofverbruiksnormen opgesteld voor vrachtwagens en bussen. Een gedetailleerde beschrijving van de normstelling en de bijbehorende simulatiemethode is te vinden in (HVFESSEG, 2005). Hieronder worden de hoofdlijnen van dat document samengevat.

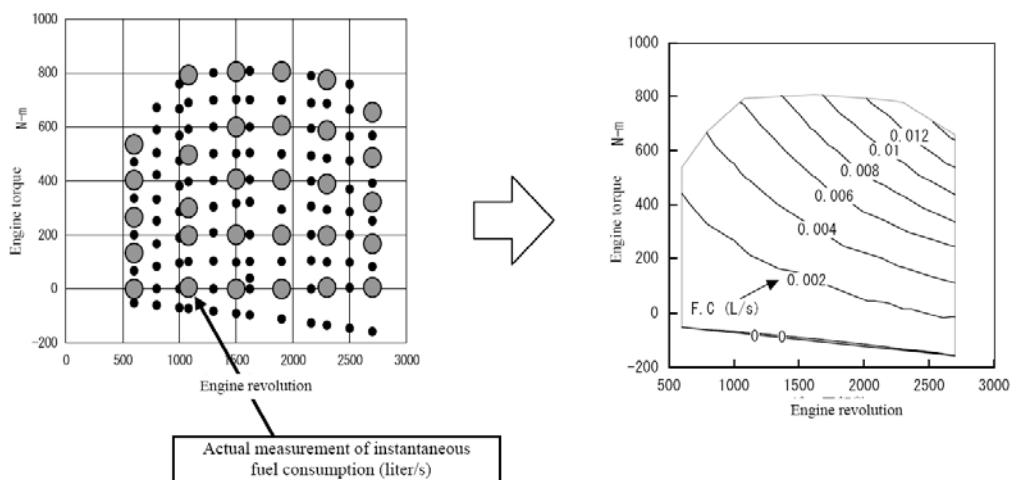
G.1 Berekeningsmethodiek

Voor een gegeven voertuigmodel wordt het brandstofverbruik door middel van simulatie berekend op basis van:

- een van metingen op een motorproefstand afgeleid statisch motorkenveld met brandstofverbruik als functie van koppel en toerental van de motor (zie hieronder);
- modelspecifieke gegevens over de toegepaste versnellingsbak in termen van aantal versnellingen en overbrengingsverhoudingen;
- modelspecifieke gegevens over de bandenmaat (tyre dynamic load radius);
- gestandaardiseerde voertuigparameters voor de klasse waarin het voertuig zich bevindt, m.b.t. voertuiggewicht, rolweerstand, luchtweerstand en frontaal oppervlak;
- twee gestandaardiseerde testcycli (snelheid-tijd patronen): de JE05 cyclus voor stadsverkeer en een cyclus voor inter-urban verkeer (80 km/h constant met door de tijd wisselende gradiënt).

Figure Engine Fuel Efficiency Map – How to Create

For each combination of the engine's revolution (at least 6 points) and torque (at least 5 points), measure the instantaneous value of fuel consumption; and create a fuel efficiency map.



Op basis van voor een werkelijk voertuig specifieke gegevens over motor en versnellingsbak wordt dus d.m.v. simulatie het brandstofverbruik bepaald voor de veronderstelde toepassing van die motor en versnellingsbak in een gestandaardiseerd (voor die klasse typisch) voertuig. Maatregelen aan het voertuig die de rol- en luchtweerstand verlagen worden in deze methodiek dus niet meegenomen. Ook effecten van toepassing van automatische versnellingsbakken en geautomatiseerde handbakken (automated manual transmission – AMT) kunnen in de simulatie niet meegenomen worden. In (HVFESG, 2005) wordt dat erkend en wordt opgemerkt dat er men nog werkt aan een methodiek om ook die aspecten te kunnen evalueren. Het is ons echter niet bekend of dat al tot resultaten heeft geleid.

Table 3 Urban Drive Mode

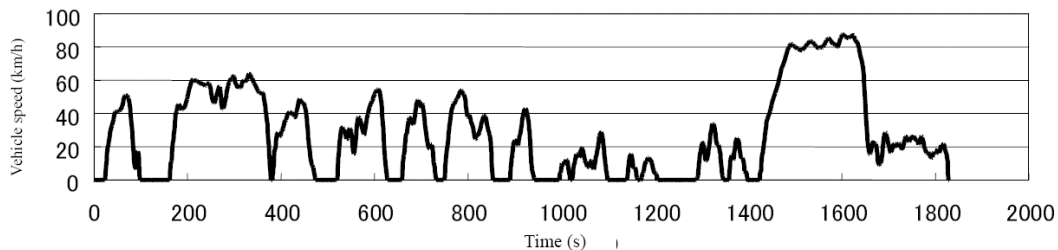
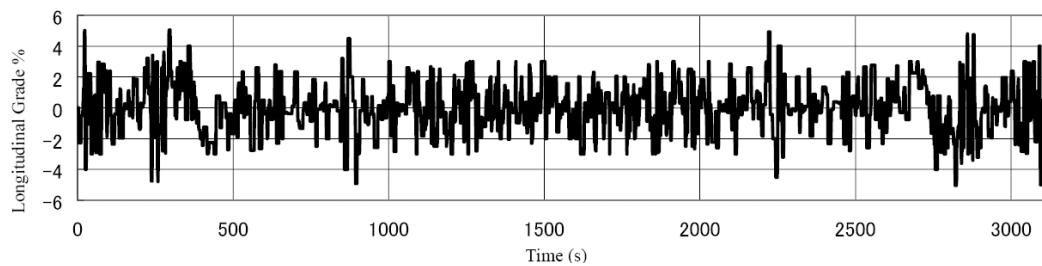


Table 4 Interurban Drive Mode



De verbruikscijfers zoals berekend op de twee cycli worden samengesteld tot een eindresultaat op basis van gewogen middeling waarbij de veronderstelde aandelen stadsverkeer en inter-urban verkeer voor de verschillende voertuigklassen verschillend zijn:

Energy consumption efficiency (fuel efficiency) shall be calculated using the following equation.

$$E = 1 / \{ \alpha u / E_u + \alpha h / E_h \}$$

Where,

E : Energy consumption efficiency (fuel efficiency) (km/l)

E_u : Urban drive mode energy consumption efficiency (fuel efficiency) (km/l)

E_h : Interurban drive mode energy consumption efficiency (fuel efficiency) (km/l)

αu : Proportion of urban drive

αh : Proportion of interurban drive



Table Proportion of the Urban and Interurban Drive Modes

Vehicle type	Passenger vehicles (11 persons or more)			Freight vehicles			
	Ordinary bus		Route bus	Other than tractor		Tractor	
	14 tons or less	Over 14 tons		20 tons or less	Over 20 tons	20 tons or less	Over 20 tons
Drive proportion							
Upper: Urban mode	0.9	0.65	1.0	0.9	0.7	0.8	0.9
Lower: Interurban mode	0.1	0.35	0.0	0.1	0.3	0.2	0.1

De methodiek is gevalideerd door rollenbankmetingen aan 4 concrete voertuigen te vergelijken met simulaties aan voertuigen met dezelfde specificaties. Onderstaande figuur bevestigt dat brandstofverbruik goed kan worden berekend m.b.v. een simulatie op basis van een quasi-statisch motorkenveld. Deze vergelijking zegt echter niets over de mogelijke verschillen tussen het werkelijke brandstofverbruik van een voertuig in een bepaalde klasse en het verbruik dat wordt gesimuleerd op basis van een gestandaardiseerd voertuig dat typisch is voor die klasse.

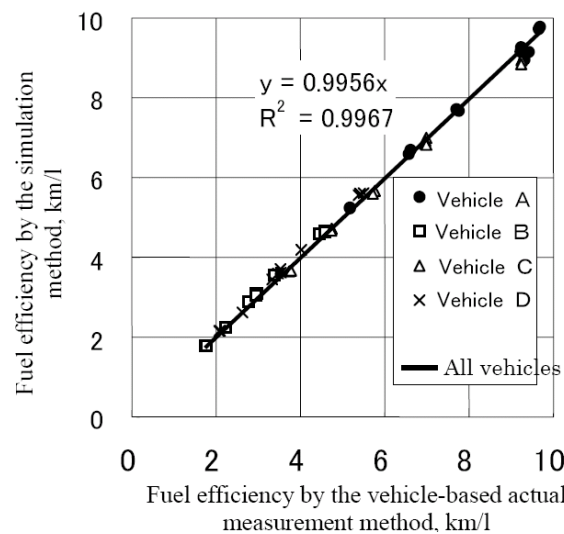


Figure 2 Accuracy of Fuel Efficiency Estimated by the Simulation Method

(Comparison in fuel efficiency between by the vehicle-based actual measurement method and by the simulation method)

G.2 Normstelling

De normen zijn bepaald op basis van vergelijkingen van het brandstofverbruik van vrachtwagens en bussen binnen dezelfde klasse. Voor iedere klasse is een aparte limiet bepaald. De normen gelden als brandstofverbruikslimiet voor voertuigen die in het target year 2015 en later worden verkocht. De verbruiksnormen zijn uitgedrukt in km/l en zijn enkele procenten (tot maximaal 10%) scherper gesteld dan het verbruik van het zuinigste voertuig per klasse in 2002. De wetge-

ving is in 2002 ingegaan en geeft fabrikanten dus tot 2015 de tijd om in één of twee productgeneraties te komen tot voertuigmodellen die aan de gestelde normen voldoen.

De Japanse wetgeving bevat ook een labelling-voorschrift. Fabrikanten zijn verplicht om in de showroom, op tentoonstellingen en in folders de verbruikscijfers duidelijk en opvallend te vermelden.

Vrachtwagens (excl. trekkers)

Category	Gross Vehicle Weight Range (t)	Maximum Load Range (t)	Target Standard Values (km/l)
1	3.5<&≤7.5	≤1.5	10.83
2		1.5<&≤2	10.35
3		2<&≤3	9.51
4		3<	8.12
5	7.5<&≤8		7.24
6	8<&≤10		6.52
7	10<&≤12		6.00
8	12<&≤14		5.69
9	14<&≤16		4.97
10	16<&≤20		4.15
11	20<		4.04

Trekkers

Vehicle Category	Gross Vehicle Weight Range (t)	Target Standard Values (km/l)
1	≤20	3.09
2	20<	2.01

Stadsbus ('route bus')

Vehicle Category	Gross Vehicle Weight Range (t)	Target Standard Values (km/l)
1	6<&≤8	6.97
2	8<&≤10	6.30
3	10<&≤12	5.77
4	12<&≤14	5.14
5	14<	4.23

Touring car / coach ('ordinary bus')

Vehicle Category	Gross Vehicle Weight Range (t)	Target Standard Values (km/l)
1	3.5<&≤6	9.04
2	6<&≤8	6.52
3	8<&≤10	6.37
4	10<&≤12	5.70
5	12<&≤14	5.21
6	14<&≤16	4.06
7	16<	3.57



H Samenvatting van de resultaten van het HyWays-project

H.1 Inleiding

In het HyWays-project³² is een roadmap ontwikkeld voor de introductie van waterstof en waterstofvoertuigen in tien deelnemende Europese landen tussen nu en 2050. HyWays is een zgn. integrated project in het 6e Kader Programma³³, gefinancierd door de Europese Commissie en deelnemende overheidsagent-schappen, onderzoeksinstituten en industrieën. Samen met andere projecten is het gelieerd aan het European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform³⁴. Het project bevindt zich momenteel in de eindfase. Eerste resultaten zijn beschikbaar maar nog geen gedetailleerde rapportages. Vanuit Nederland nemen SenterNovem, ECN en het bedrijf HyGear deel aan het project. De ontwikkeling van de roadmap is ondersteund door gedetailleerde modelberekeningen o.a. m.b.t. well-to-wheel energiegebruik, broeikasgasemissies en kosten, macro-economische analyses, berekening van infrastructuurkosten, et cetera. Data voor deze berekeningen werden geleverd door onderzoeksinstituten en door de deelnemende industrieën (o.a. voertuigproducenten, energieproducenten, fabrikanten van brandstofcellen en technologie voor waterstofinfrastructuur).

De resultaten van HyWays tonen op basis van de in het project gebruikte data en gemaakte veronderstellingen een lange-termijn toekomstbeeld waarin brandstofcelvoertuigen in combinatie met waterstof geproduceerd uit fossiele bronnen in combinatie met CO₂-opslag³⁵ en deels uit duurzame bronnen een kosteneffectieve technische oplossing bieden voor het bereiken van significante CO₂-reducties. Dit beeld wordt hieronder beknopt samengevat.

Ketenanalyse van kosten en CO₂-emissies

Figuur 93 schetst de in HyWays gemaakte aanname m.b.t. de ontwikkeling van energieprijzen op lange termijn. Voor 2030 wordt een olieprijs van tussen de 60 en 70 €/bbl verwacht en deze stijgt tot 2050 door naar 100 €/bbl. Op basis van deze energiekosten en schattingen voor de kosten van productie en distributie van waterstof op lange termijn worden voor 2050 de in Figuur 94 weergegeven brandstofkosten per kWh energie-inhoud berekend. Detaildata m.b.t. de rendementen en kosten van de verschillende omzettingstappen in de genoemde energieketens zijn nog niet gepubliceerd.

De in HyWays veronderstelde olieprijsen zijn zeer hoog in vergelijking met andere studies. Dit kan grote effecten hebben op de berekening van CO₂-vermijdingskosten. De effecten zouden in het geval van de hier getoonde HyWays resultaten echter mee kunnen vallen omdat verondersteld wordt dat een

³² <http://www.HyWays.de>.

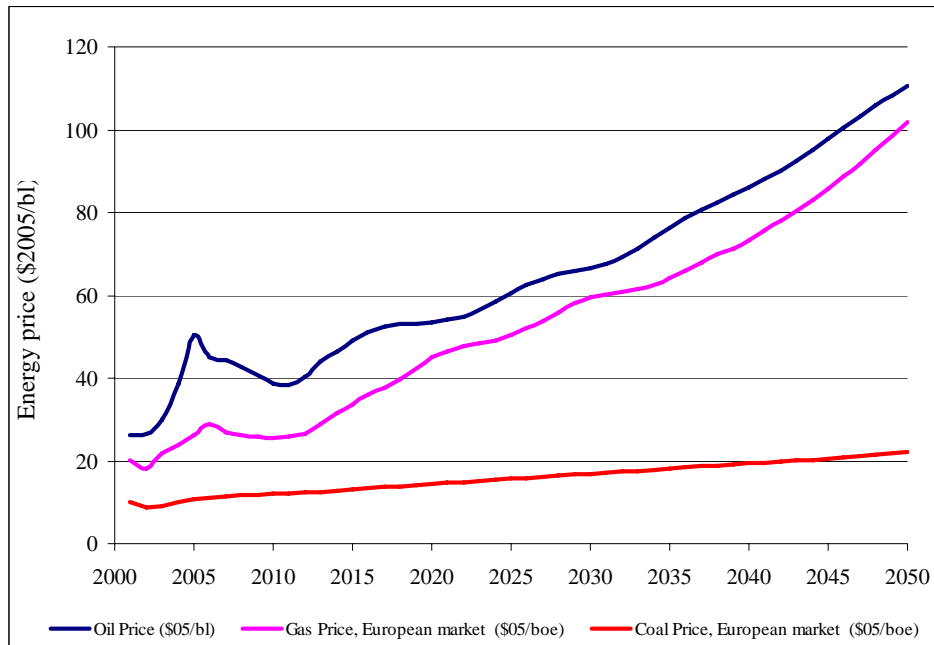
³³ Contract N° 502596.

³⁴ <https://www.hfpeurope.org/>.

³⁵ CCS: Carbon Capture and Sequestration.

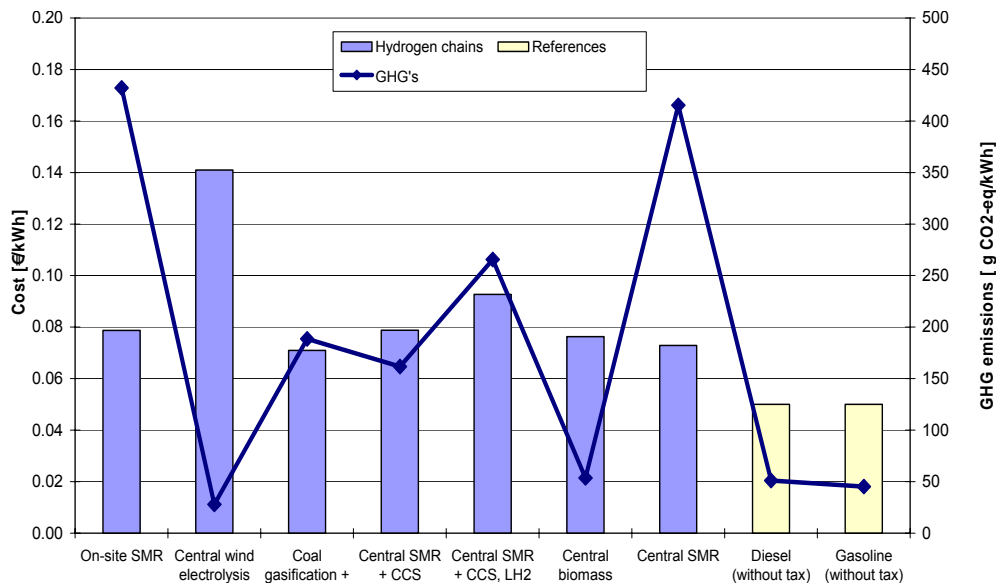
groot deel van de gebruikte waterstof uit aardgas wordt geproduceerd en de prijs daarvan meestijgt met de olieprijs.

Figuur 93 Ontwikkeling van energieprijzen in HyWays-scenario



Bron: HyWays, 2007.

Figuur 94 WTW-brandstofkosten (in €/kWh) en WTW-broeikasgasemissies (in gCO₂-eq./kWh) in 2050 van via verschillende ketens geproduceerde waterstof vergeleken met benzine en diesel



Bron: HyWays, 2007.

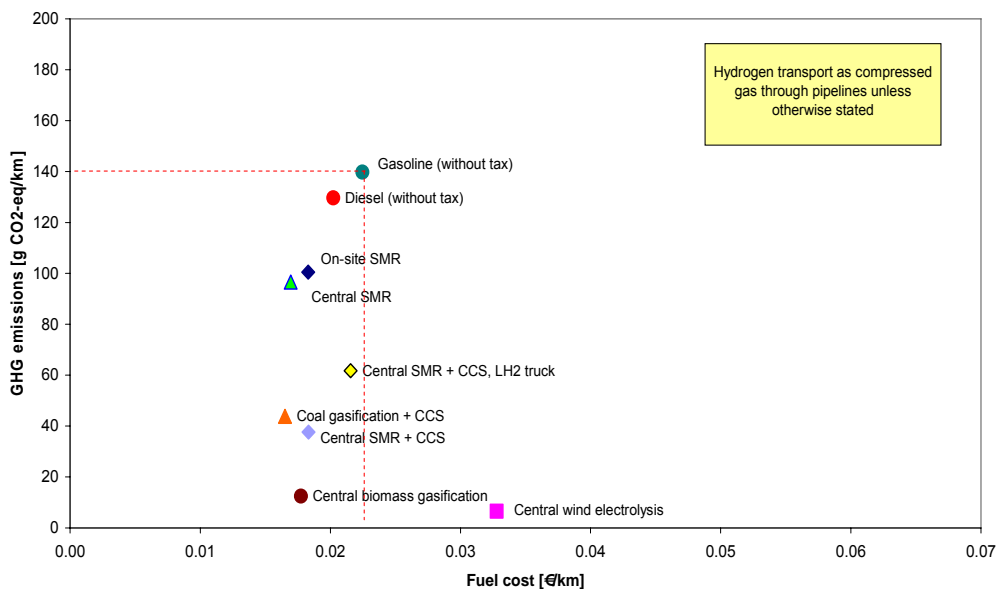
Een belangrijke conclusie uit Figuur 94 is dat waterstof uit aardgas of kolen (als dan niet met CCS) volgens deze berekeningen een factor 1,5 tot 2 duurder per kWh dan benzine en diesel. Omdat brandstofcelvoertuigen veel efficiënter zijn



dan voertuigen met een verbrandingsmotor zijn de resulterende brandstofkosten per kilometer echter voor de meeste routes lager dan voor conventionele benzinevoertuigen. Dit is weergegeven in Figuur 95. In beide figuren zijn behalve de kosten ook de Well-to-Wheel broeikasgasemissies weergegeven. De onderliggende data m.b.t. het rendement van brandstofvoertuigen zijn nog niet gerapporteerd, maar zijn vanzelfsprekend wel van cruciaal belang in deze vergelijking.

Via elektrolyse uit windenergie geproduceerde waterstof kenmerkt zich door zeer lage WTW CO₂-emissies en relatief hoge kosten. Met brandstofcellen gebruikmakend van waterstof uit aardgas middels kleinschalige on-site steam reforming of grootschaliger centrale steam reforming zijn reeds zonder toepassing van CO₂-opslag CO₂-reducties van 30% haalbaar. Wanneer waterstof wordt geproduceerd uit aardgas of kolen in combinatie met CO₂-opslag dan kunnen de WTW CO₂-emissies van brandstofcelvoertuigen 60 tot 70% lager zijn dan die van benzinevoertuigen. Productie van waterstof door vergassing van biomassa, tenslotte, maakt een WTW CO₂-reductie van 90% mogelijk. De kosten daarvoor zijn volgens (HyWays, 2007) vergelijkbaar met die van waterstof uit fossiele bronnen.

Figuur 95 WTW-brandstofkosten (in €/km) en WTW-broeikasgasemissies (in gCO₂-eq./km) van hybride brandstofcelvoertuigen in 2050 op via verschillende ketens geproduceerde waterstof vergeleken met een conventioneel voertuig op benzine (stand der techniek 2010)



Bron: HyWays, 2007.

Behalve door brandstofkosten wordt de overall kosteneffectiviteit van waterstofvoertuigen bepaald door de kosten van het voertuig. Brandstofcelvoertuigen zijn op dit moment nog meerder ordegrottes duurder dan conventionele voertuigen. Door een combinatie van technische innovaties en de leer- en schaafeffecten die optreden bij steeds verder toenemende serieproductie zullen deze kosten in de toekomst sterk kunnen dalen. In HyWays is m.b.v. data van de auto-industrie en leercurves op componentniveau (met progress ratio's zoals weergegeven in Tabel 71) een prognose gemaakt van de ontwikkeling van de kosten van brand-

stofcelvoertuigen en van waterstofvoertuigen met een verbrandingsmotor (ICE) als functie van de cumulatieve productie. Deze is weergegeven in Figuur 96. De belangrijkste conclusie uit Figuur 96 is dat volgens deze prognoses brandstofcelvoertuigen bij een cumulatieve productie van enige tientallen miljoenen zelfs goedkoper worden dan conventionele personenauto's.

Tabel 71 Progress ratio's voor de leercurves voor verschillende componenten in de aandrijflijn van directe en hybride brandstofcelvoertuigen op waterstof

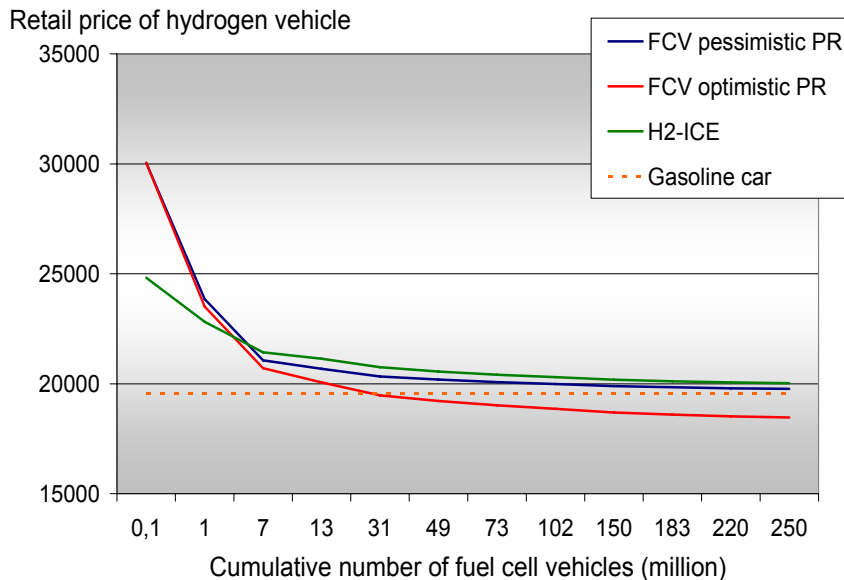
Table 3.3 Progress ratios of H₂-technology components for a fuel cell car (figures from HyWays automobile industry partners)

Component	Low PR (fast cost reduction)		High PR (low cost reduction)	
	Initial phase	After 10 years	Initial phase	After 10 year
Alternative fuel tank		0.85	0.85	0.93
Electric motor		0.90	0.90	0.98
Li-Ion battery		0.90	0.90	0.98
FC system	0.80	0.90	0.82	0.92
H ₂ -ICE ^a		1.00		1.00

^a The EUCAR WTW-Study assumes the same production cost for gasoline and hydrogen engines.

Bron: HyWays, 2006.

Figuur 96 Leercurve voor de ontwikkeling van de kosten van brandstofcelvoertuigen als functie van het cumulatieve productievolume vergeleken met de kosten van een benzineauto's in 2010



Bron: HyWays, 2006, 2007.

Combinatie van de resultaten van Figuur 95 en Figuur 96 leidt tot de conclusie dat de in HyWays gemaakte aannames ertoe leiden dat bij grootschalige inzet van waterstofvoertuigen in 2050, in combinatie met waterstofproductie uit fossiele bronnen of biomassa, de CO₂-vermijdingskosten van deze optie negatief kunnen zijn.

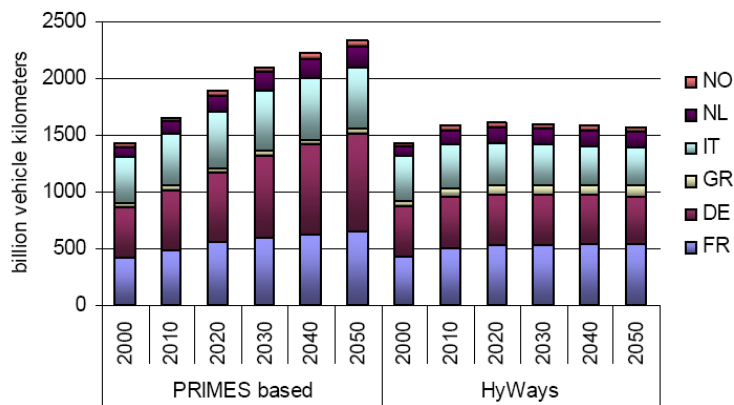


In HyWays wordt aangenomen dat waterstof en brandstofcellen kunnen worden toegepast in personenauto's, bestelauto's, bussen en lichte vrachtwagens. Voor zware vrachtwagens wordt het voor de grote actieradius benodigde tankvolume in geval van waterstof te groot geacht om toepassing zinvol te maken.

Om totale effecten van toepassing van waterstofvoertuigen op de CO₂-emissies van de transportsector te kunnen inschatten heeft HyWays eigen inschattingen gemaakt van ontwikkeling van autobezit en mobiliteit. Voor de personenautomobiliteit is deze schatting weergegeven in Figuur 97. Het project heeft er expliciet voor gekozen om sterk af te wijken van het groeiscenario zoals dat in officiële Europese prognoses op basis van het PRIMES-model wordt geschat.

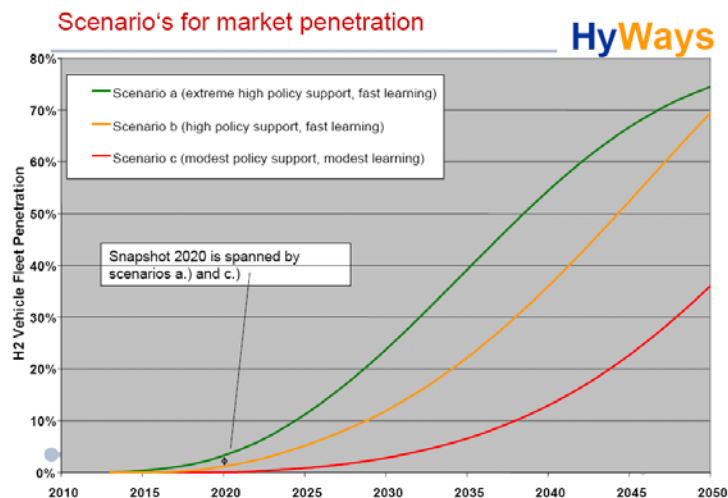
Figuur 98 geeft verschillende scenario's weer voor de veronderstelde ontwikkeling van het aandeel brandstofcelvoertuigen in de personenautovloot. Tevens zijn voor de inschatting van totaaleffecten aannamen gemaakt over de bijdrage van verschillende productieroutes voor waterstof. Deze zijn weergegeven in Tabel 72.

Figuur 97 Veronderstelde ontwikkeling van de personenautomobiliteit in de landen die in HyWays deelnemen (rechts) vergeleken met prognoses op basis van PRIMES



Bron: HyWays, 2006.

Figuur 98 Scenario's voor de groei van het aandeel van brandstofcelvoertuigen in de personenautovloot



Bron: HyWays, 2007.

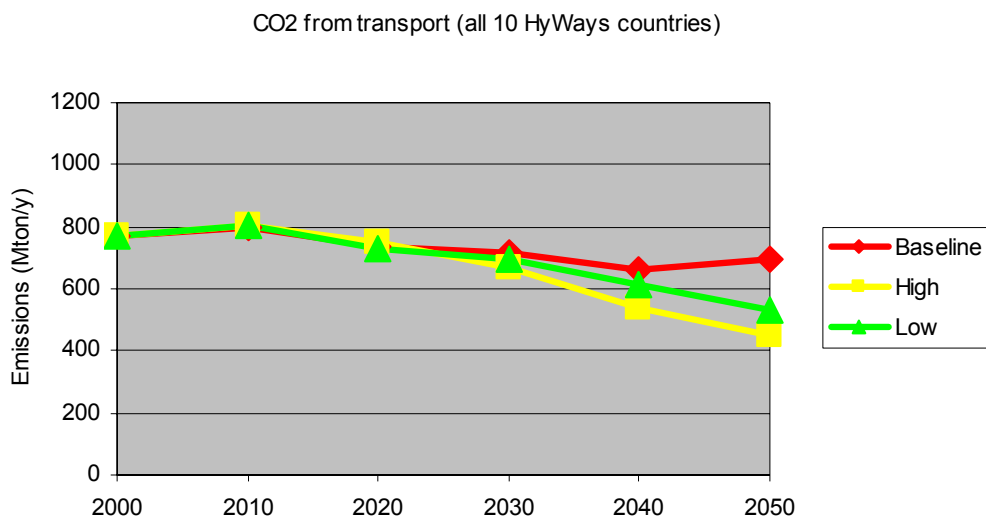
Tabel 72 Veronderstelde aandelen van verschillende productieroutes voor waterstof in het HyWays-scenario

Nr.	Feedstock	Production Process	H2 Transport	2020	2030	2050
-	Hydrogen as by-product			0%	0%	0%
1	Natural gas	On-site SMR	Filling station (FS)	25-35 %	10-20 %	1-9 %
2	Offshore wind	Central Electrolysis	Pipeline + FS	5-15 %	1-9 %	1-9 %
3	Hard coal	Gasification + CCS	Pipeline + FS	0-5 %	25-35 %	40-50 %
4	Natural gas	Central SMR + CCS	Pipeline + FS	0-5 %	25-35 %	15-25 %
5	Biomass	Central Gasification	Pipeline + FS	0-5 %	5-15 %	15-25 %
6	Natural gas	Central SMR	Pipeline + FS	35-45 %	0-5 %	0-5 %

Bron: HyWays, 2007.

De resulterende ontwikkeling van de totale CO₂-emissie van de transportsector volgens HyWays-scenario's met een hoge en een lage penetratiegraad is weergegeven in Figuur 99. Duidelijk is hieruit dat het baseline-scenario (zonder toepassing van waterstof) geen beleidsarm scenario is en reeds voor 2050 CO₂-emissies laat zien die iets onder het niveau van 200 liggen. In het scenario met een hoge penetratiegraad van waterstofvoertuigen wordt een netto CO₂-reductie van ongeveer 50% t.o.v. 2000 bereikt. Onduidelijk is welke aannames gemaakt zijn t.a.v. de CO₂-emissies van het goederenvervoer en bijvoorbeeld de toepassing van biobrandstoffen in die deelsector.

Figuur 99 Ontwikkeling van de CO₂-emissies door de transportsector in de 10 in HyWays deelnemende landen volgens het in het project gehanteerde scenario voor grootschalige toepassing van waterstof in transport



H.2 Introductiescenario's

Behalve bovenstaande berekeningen voor de situatie op lange termijn zijn in HyWays ook gedetailleerde scenario's uitgewerkt voor de manier waarop in 2050 grootschalige toepassing van waterstof in transport kan worden bereikt. Een belangrijk element daarin is dat op zeer korte termijn 2015 in zgn. 'user centres' en 'early corridors' begonnen wordt met het inrichten van een lokale waterstofinfra-



structuur en het creëren van een markt voor waterstofvoertuigen. Deze user centres kunnen gebieden zijn zoals Rijnmond waar al waterstofproductie beschikbaar is en kenmerken zich o.a. door een hoge bevolkingsdichtheid en hoge koopkracht. Vanuit die kernen kan dan de infrastructuur voor productie en distributie van waterstof verder worden uitgebreid totdat in 2035 een nagenoeg landelijke dekking wordt bereikt. De tussenliggende periode kenmerkt zich door een onvermijdelijke maar in deze aanpak wel geminimaliseerde onderbenutting van de aangelegde infrastructuur. De uitgewerkte scenario's maken het mogelijk om de kosten daarvan te kwantificeren en op grond daarvan de benodigde financiële stimulering vanuit de overheid te berekenen. HyWays (2007) laat zien dat tussen 2015 en 2020 de kosten van waterstof ongeveer 60% tot 100% hoger zijn dan rond 2030. De totale cumulatieve investering in waterstofinfrastructuur in Nederland zou rond 2030 tussen de € 2,5 en 3 miljard bedragen, waarvan ongeveer de helft voor productiefaciliteiten.

H.3 Conclusies

- HyWays schetst een toekomstbeeld waarin toepassing van waterstof in brandstofcellen op lange termijn significante CO₂-reductie mogelijk maakt bij negatieve CO₂-vermijdingskosten.
- Dit positieve beeld is sterk afhankelijk van de in HyWays gemaakte veronderstellingen m.b.t.:
 - de ontwikkeling van energieprijzen;
 - het energetisch rendement van brandstofcelvoertuigen;
 - de kosten van brandstofcelvoertuigen op lange termijn;
 - de kosten en het energetisch rendement van infrastructuur voor productie en distributie van waterstof;
 - de kosten en beschikbaarheid van CO₂-opslag als optie om de WTW CO₂-emissies van waterstof uit aardgas en kolen te reduceren.

Een gedetailleerde rapportage over de onderbouwing van deze veronderstellingen zijn op dit moment nog niet beschikbaar.

- In de tijd tussen nu en de grootschalige toepassing van waterstofvoertuigen (bijv. in 2030) zullen voertuigen nog relatief duur zijn en zal ook de geproduceerde waterstof duurder zijn dan in de eindsituatie. Met name voor de voertuigkosten geldt dat het grootste deel van de kostenreductie, die op lange termijn mogelijk is, het gevolg is van leer- en schaaffecten die pas optreden wanneer ook daadwerkelijk wordt begonnen met het op grote schaal toepassen van waterstof en brandstofcelvoertuigen. Het bereiken van het voor 2050 geschetste beeld waarin brandstofcelvoertuigen zelfs een kosteneffectieve oplossing voor CO₂-reductie in transport worden vereist dus dat reeds op korte termijn (2010-15) begonnen wordt met investering in infrastructuur en vermarkting van voertuigen.

Literatuur

HyWays, 2006

HyWays, A European Roadmap, Assumptions, visions and robust conclusions from project Phase I

Rapport te downloaden van: <http://www.HyWays.de>

HyWays, 2007

Results of HyWays for Netherlands

Presentatie door M. Weeda en H. Jeeninga (ECN) op 5^e Nederlandse stakeholder meeting van het HyWays-project, Utrecht, 16 januari 2007

