

# INVENTARISATIE MILIEUPOTENTIEEL BRANDSTOFCELVOERTUIGEN VOOR HET NEDERLANDSE WEGVERKEER

M.Weeda  
J.W. Dijkstra  
A.C.B. den Ouden  
R.P. de Smidt  
E.P. Weijers

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door:  R.P. de Smidt	Goedgekeurd door:  R.K.A.M. Mallant	ECN-Schoon Fossiel  Werkgroep: Systeem aspecten
Geverifieerd door:  M. Weeda	Vrijgegeven door:  C.A.M. van der Klein	

## Verantwoording

Dit project is uitgevoerd in het kader van het ENGINE-programma en maakte deel uit van de voorbereidende werkzaamheden voor het cluster “Brandstofcel Voertuigen”. Het project staat bekend onder Enginenummer SF03 295. Het ECN projectnummer is 7.2486. Raakvlak met deze studie heeft de voor de cluster “Brandstofcel Voertuigen” uitgevoerde clusteranalyse. Deze analyse staat weergegeven in het ECN memonummer: 7.8036/02-GR1.

## Abstract

A study has been performed to assess the environmental benefits of fuel cell vehicles for road traffic in the Netherlands. For this an inventory of the key figures of the Dutch transportation sector and its emissions has been made. Also a literature study of well-to-wheels studies has been made. The results of these studies have been compared with respect to emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and small particulate matter (PM10) for conventional and fuel cell vehicles. With these results the emissions reduction potential for the Netherlands has been calculated. As a result of the study it can be concluded that the emission of CO<sub>2</sub> can be reduced with around 45% compared to current emissions. Also, the emission of NO<sub>x</sub> and PM10 can be lowered considerable with respectively around 70% and 55% compared to current emissions. However, these lowered emissions can only be reached if all Dutch road going vehicles with internal combustion engine are replaced by fuel cell vehicles. Unfortunately, this can not be reached within the nearby future. Therefore, the environmental benefits of fuel cell vehicles to Dutch emission objectives can be significant, but will be on the long term.

## Keywords

Nederlandse transport sector  
Well-to-wheels analyse  
Interne verbrandingsmotor  
Ottomotor  
Dieselmotor  
Brandstofcelvoertuigen  
Personenauto  
Bestelauto  
Lichte vrachtwagen  
Stadsbus  
Kooldioxide (CO<sub>2</sub>)  
Stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>)  
Fijn stof (PM10)  
Waterstof (H<sub>2</sub>)

Dutch transportation sector  
Well-to-wheels analysis  
Internal combustion engine (ICE)  
Otto engine  
Diesel engine  
Fuel cell vehicles (FCV)  
Passenger car  
Delivery van  
Light duty truck  
Regional bus  
Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)  
Nitrogen oxide gases (NO<sub>x</sub>)  
Particulate matter (PM10)  
Hydrogen (H<sub>2</sub>)

## INHOUD

1.	INLEIDING	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Probleemstelling	8
1.3	Doelstelling	8
1.4	Scope en focus	8
1.5	Opbouw rapport	9
2.	OMVANG NEDERLANDSE VERVOERSECTOR	10
2.1	Inleiding	10
2.2	Aantal motorvoertuigen	10
2.2.1	Personenauto's	10
2.2.2	Bedrijfsauto's	11
2.3	Afgelegde kilometers	11
2.4	Brandstofgebruik	12
3.	EMISSIES WEGVERKEER NEDERLAND	13
3.1	Typen emissies	13
3.1.1	Broeikaseffect	13
3.1.2	Zure depositie	14
3.1.3	Smogvorming	14
3.1.4	Fijn stof	14
3.2	Omvang emissies	15
3.2.1	Historisch emissies totale wegverkeer	15
3.2.2	'Actuele' emissies per type voertuig	16
3.3	Toekomstige ontwikkelingen	17
3.3.1	Omvang van de vervoerssector	17
3.3.2	CO <sub>2</sub> emissies	17
3.3.3	NO <sub>x</sub> emissies	17
3.3.4	VOS emissies	18
3.3.5	Fijn stof emissies	18
3.3.6	N <sub>2</sub> O emissies	18
3.3.7	SO <sub>2</sub> emissies	18
4.	WELL-TO-WHEELS IN DE LITERATUUR	19
4.1	Inleiding well-to-wheels	19
4.1.1	Energieketens	19
4.1.2	Well-to-wheels analyse	20
4.2	Geraadpleegde literatuur	22
4.3	Technologische opties	23
4.3.1	Well-to-tank	23
	4.3.1.1 Primaire energiebronnen – winning, transport en opslag	23
	4.3.1.2 Secundaire brandstoffen – productie, transport, opslag en distributie	24
4.3.2	Tank-to-wheels	24
	4.3.2.1 Krachtbron	25
	4.3.2.2 Transmissie	25
	4.3.2.3 Voertuigtype	25
4.4	Definitie categorieën	26
4.5	Resultaten well-to-wheels in de literatuur	27
4.5.1	Aard en hoeveelheid data	27
4.5.2	Well-to-wheels rendementen	28
	4.5.2.1 Rendementen well-to-tank ketens	28
	4.5.2.2 Rendementen tank-to-wheels ketens	29
	4.5.2.3 Rendementen well-to-wheels ketens	29

4.5.3	Emissies well-to-wheels ketens	30
4.5.3.1	CO <sub>2</sub> -emissies personenauto's	31
4.5.3.2	CO <sub>2</sub> -emissies bestelauto's en lichte vrachtwagens	32
4.5.3.3	CO <sub>2</sub> -emissies bussen	33
4.5.4	Compensatie uitgangspunten referentie	34
4.5.5	Gemiddelde relatieve emissies: CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> en PM10	34
5.	KWANTIFICERING MILIEUPOTENTIEEL	37
5.1	Inleiding	37
5.2	Uitgangspunten	37
5.3	Berekening CO <sub>2</sub> -emissiereductiepotentieel	37
5.4	Berekening NO <sub>x</sub> -emissiereductiepotentieel	38
5.5	Berekening PM10-emissiereductiepotentieel	39
6.	DISCUSSIE EN CONCLUSIES	41
6.1	Emissies wegverkeer Nederland	41
6.2	Literatuuronderzoek	41
6.3	Emissiereductiepotentieel	42
6.3.1	Kooldioxide	42
6.3.2	Stikstofoxide	42
6.3.3	Fijn stof (PM10)	42
	REFERENTIES	43
	bijlage A Acroniemen	45
	bijlage B Overzicht veelgebruikte studies	47
	Literatuurdata	50



## SAMENVATTING

De brandstofcel wordt gezien als een belangrijke optie om op termijn schoon en efficiënt vervoer vorm te kunnen geven. Om inspanningen op dit gebied te rechtvaardigen is kwantificering van de mogelijke milieuvordelen gewenst en dienen deze te worden afgezet tegen mogelijke voordelen van de alternatieven. In dit rapport is getracht voor het Nederlandse wegverkeer de effecten op broeikasgas- en overige emissies te kwantificeren door voertuigen met interne verbrandingsmotoren te vergelijken met brandstofcelvoertuigen.

Kwantificering heeft plaatsgevonden door recente emissiegegevens voor het wegverkeer in Nederland te combineren met resultaten van modelstudies naar emissies van voertuigen die worden aangedreven door alternatieve aandrijfsystemen en brandstoffen. Hierbij is niet alleen gekeken naar energiegebruik en emissies door voertuigen, maar is de volledige brandstofketen beschouwd, inclusief winning, productie, transport, opslag en distributie van brandstof. Dit is van belang om te voorkomen dat voor opties wordt gekozen die slechts leiden tot verschuiving van energiegebruik en emissies in de keten, maar over de gehele keten niet tot verbetering of zelfs tot verslechtering leiden. Deze ketenbrede analyses staan bekend als 'well-to-wheels' analyses.

Uit de analyse die is uitgevoerd komt naar voren dat brandstofcelvoertuigen ketenbreed tot een significante emissiereductie kunnen leiden. Een eerste schatting geeft aan dat bij het tanken van waterstof geproduceerd uit aardgas, en bij volledige vervanging van het huidige Nederlandse wagenpark door brandstofcel aangedreven voertuigen, een jaarlijkse emissiereductie van 11 Mton CO<sub>2</sub>-equivalent voor personenauto's, 2,5 Mton CO<sub>2</sub>-equivalent voor bestelauto's en lichte vrachtwagens en 0,2 Mton CO<sub>2</sub>-equivalent voor bussen bereikt kan worden. Dit betekent een CO<sub>2</sub>-emissiereductie van circa 45% ten opzichte van de huidige CO<sub>2</sub>-emissie door het wegverkeer. Indien geen waterstof wordt getankt maar de huidige brandstoffen aan boord van de voertuigen in waterstof worden omgezet, leidt dit tot een emissiereductie van circa 20%. Deze getallen gelden ten opzichte van een interne verbrandingsmotor op benzine of diesel, waarbij rekening is gehouden met de te verwachte toekomstige optimalisatie van deze technologie.

Er zijn veel studies en gegevens met betrekking tot well-to-wheels analyses beschikbaar, echter in dit rapport zijn alleen die studies gebruikt waarbij brandstofcelvoertuigen centraal stonden. Desalniettemin zijn er per schakel in een well-to-wheels keten meerdere alternatieven mogelijk, en per alternatief zijn er vaak meerdere varianten. Hierdoor is een enorm aantal verschillende well-to-wheels ketens te onderscheiden. De meeste studies gaan over personenauto's met interne verbrandingsmotor. Slechts een beperkt aantal studies beschouwt aandrijving doormiddel van een brandstofcel. Daarvan gaat nog een groot deel over brandstoffen anders dan benzine, diesel of waterstof. Tot slot is er nog een deel dat deze brandstoffen wel beschouwt, maar veronderstelt dat deze vanuit andere primaire bronnen dan aardolie of aardgas worden geproduceerd. Daarnaast worden bij vergelijkbare ketens niet zelden uiteenlopende resultaten gevonden. Dit wordt met name veroorzaakt door verschillen in locatie-specifieke aannamen en omstandigheden, verschillen in technologie-specifieke aannamen en verschillen in berekeningsmethoden. Veruit de meeste studies hebben een Amerikaans perspectief.

Samenvattend kan worden gesteld, dat wanneer het gaat om de Nederlandse situatie, de well-to-wheels literatuur voldoet voor het maken van grove schattingen en het identificeren van globale trends. Voor nauwkeuriger en meer betrouwbare inschattingen dient te worden uitgegaan van energie- en emissiekentallen voor de afzonderlijke schakels waaruit de well-to-wheels ketens zijn opgebouwd. Hiermee kunnen vervolgens ketens voor alternatieven worden samengesteld die rekening houden met specifieke omstandigheden, zoals die in Nederland gelden. Echter, om nut en noodzaak van ontwikkeling van specifieke technologie op het gebied van brandstofcelvoertuigen te kunnen beoordelen is ook dit niveau niet toereikend. Dit vereist meer gedetailleerde modellen voor voertuig-, transmissie- en aandrijfsystemen.

# 1. INLEIDING

## 1.1 Achtergrond

De vervoersector neemt een substantieel deel van het totale energieverbruik in Nederland voor zijn rekening en levert daarmee een grote bijdrage aan de totale Nederlandse emissie van kooldioxide (CO<sub>2</sub>). Daarnaast is de vervoersector een belangrijke veroorzaker van emissies zoals stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), koolmonoxide (CO), vluchtige koolwaterstoffen (VOS) en fijn stof. Deze emissies vormen enerzijds een aanzienlijke milieubelasting en anderzijds een probleem voor de volksgezondheid, vooral in verstedelijkte gebieden.

Vanwege het aandeel van de vervoersector in Nederland en de nog immer groeiende mobiliteit, is deze sector een belangrijk aangrijpingspunt om te komen tot energiebesparing en reductie van CO<sub>2</sub> en overige emissies (luchtverontreinigingen). Opties om te komen tot verbetering zijn in het algemeen:

- Terugdringen van de vervoersvraag;
- Modal shift:
  - van individueel naar collectief vervoer
  - van wegtransport naar vervoer over water en rails;
- Terugdringen van energievraag en emissies op brandstofproductie- en voertuigniveau;
- Inzet van schonere conventionele en alternatieve brandstoffen.

Vooraf van de laatste twee opties wordt veel verwacht. Voor wat betreft alternatieve brandstoffen gaat hierbij veel aandacht uit naar brandstoffen op basis van biomassa en aardgas [Commission of the European Communities]. Bij het terugdringen van de energievraag en de emissies op voertuigniveau, is nog verbetering mogelijk via gewichtsreductie door toepassing van nieuwe materialen en het verlagen van lucht- (stroomlijn en afwerking van voertuigen) en rolweerstand (materiaal en profiel van banden). Daarnaast blijkt ook de interne verbrandingsmotor nog lang niet uitontwikkeld en is verdergaande emissiereductie van deze motoren mogelijk door toepassing van nieuwe technologieën.

Een andere optie die bij het terugdringen van de energievraag en emissies op voertuigniveau steeds nadrukkelijker in beeld komt, is de toepassing van brandstofcellen. Brandstofcellen in combinatie met elektromotoren bieden een uitstekend alternatief voor de interne verbrandingsmotor, door de lagere emissies en het potentieel gunstiger totaalrendement van een dergelijk aandrijfsysteem. Bijkomend voordeel is de geringere geluidsproductie van dit alternatief waardoor geluidshinder van voertuigen, vooral belangrijk in de stedelijke omgeving, zal afnemen.

De brandstofcel wordt in het algemeen gekarakteriseerd als een conversietechnologie die met een hoog rendement elektriciteit uit waterstof produceert en die vrij is van schadelijke emissies. In relatie tot vervoer zijn dit belangrijke argumenten. Deze karakterisering heeft echter alleen betrekking op voertuigniveau en dan nog alleen wanneer zuivere waterstof als brandstof wordt gebruikt.

Voordat waterstof aan boord van het voertuig kan worden gebracht dient dit echter eerst te worden geproduceerd. Vooralsnog zal dit voornamelijk uit fossiele bronnen plaatsvinden. Ten opzichte van de productie van benzine en diesel kost de productie van waterstof meer energie en zal daarom met meer CO<sub>2</sub>-emissie gepaard gaan. Op deze manier leidt de inzet van met waterstof gevoede brandstofcellen in ieder geval tot een verschuiving van energiegebruik en emissies naar elders in de keten. Of er over de gehele keten ook sprake is van energiebesparing

en emissiereductie hangt af van onderlinge verhoudingen van efficiency- en emissiekentallen. Deze verhoudingen zijn op hun beurt weer afhankelijk van tal van aspecten en daarom op voorhand niet duidelijk. Hierbij kan worden gedacht aan de efficiencykarakteristieken van de conversietechnologieën in de keten, samenstelling van het voertuigpark, gemiddeld voertuiggebruik, aard en herkomst van de fossiele bronnen, etc.

Wordt niet waterstof aan boord van het brandstofcelvoertuig gebracht, maar blijven de huidige logistieke brandstoffen gebruikt worden dan zullen deze aan boord van het voertuig zelf in waterstof moeten worden omgezet. Deze omzetting gaat gepaard met efficiencyverlies, niet alleen omdat kleinschalige waterstofproductie minder efficiënt is dan grootschalige waterstofproductie, maar ook omdat de brandstofcel in dit geval niet gevoed wordt met zuiver waterstof, maar met een reformatgas ( $\text{CO}_2$  en  $\text{H}_2$ ). Daarnaast is water dan niet meer de enige emissie, maar zal het voertuig op z'n minst ook een  $\text{CO}_2$ -emissie kennen. Brandstofproductie en distributie zullen in dit geval wellicht weinig tot niet verschillen ten opzichte van de huidige situatie.

## 1.2 Probleemstelling

De brandstofcel is een efficiënte en schone conversietechnologie en is een optie voor elektrisch aangedreven vervoer. Vanwege de impact die de technologie heeft op de gehele brandstofketen is het echter niet duidelijk of, en zo ja tot hoeveel energiebesparing en emissiereductie toepassing van deze technologie leidt. De vergelijking tussen voertuigen met een interne verbrandingsmotor en een brandstofcel hangt ook af van zaken als samenstelling van het wagenpark en gemiddeld voertuiggebruik, daarom zullen de voor- en nadelen van geval tot geval verschillen. Inzicht in de gevolgen voor primair energiegebruik en emissies in Nederland bij vervanging van met interne verbrandingsmotoren uitgeruste voertuigen door brandstofcel aangedreven elektrische voertuigen ontbreekt tot op heden.

## 1.3 Doelstelling

Dit rapport beoogt een eerste schatting te verschaffen en te kwantificeren wat de effecten zijn op primair energiegebruik en emissies (in termen van  $\text{CO}_2$ - en  $\text{NO}_x$ -emissies en uitstoot van fijn stof) in de Nederlandse situatie, bij vervanging van met interne verbrandingsmotoren uitgeruste voertuigen door met brandstofcellen uitgeruste elektrische voertuigen. Hiertoe wordt met behulp van een literatuurstudie een inventarisatie gemaakt van de huidige emissies, van de technologieën voor brandstofcelvervoer en de emissies hiervan. Hierbij wordt de gehele keten van primaire brandstof ('well') tot de uiteindelijke emissie van het voertuig zelf ('wheels') beschouwd.

## 1.4 Scope en focus

Gestreefd wordt naar een gedegen inzicht in het primaire energie- en emissiereductie potentieel van brandstofcelvoertuigen voor de gehele Nederlandse vervoerssector. Binnen de vervoerssector kan globaal onderscheid worden gemaakt in type vervoer en de omgeving waarin deze plaats vindt (zie

Tabel 1). Hierbij dient vermeldt te worden dat binnen deze studie stedelijk- en interlokaal vervoer, gezien de geringe aanwezigheid van ontkoppeling van deze twee binnen de geraadpleegde literatuur, als één zijn beschouwd.

De focus in deze studie is gericht op individueel- en collectief personenvervoer en vrachtvervoer over de weg. Hiervoor is gekozen omdat deze categorieën verantwoordelijk zijn voor het grootste deel van de emissies welke door het wegverkeer in Nederland geëmitteerd worden. Tevens liggen de inspanningen van automobielfabrikanten, met als zwaartepunt



personenauto's, hoofdzakelijk op dit gebied. Beargumentering voor de keuze van collectief personenvervoer en vrachtvervoer is dat in deze segmenten de voertuigen voornamelijk zijn uitgerust met dieselmotoren welke worden gekenmerkt door een relatief grote uitstoot van diverse schadelijke gasvormige stoffen, roet en fijn stof. Hiernaast zijn de voordelen van brandstofcelvoertuigen voor milieu en omgeving voor deze typen voertuigen, welke grotendeels binnenstedelijk worden toegepast, het grootst.

Tabel 1: *Scope van de studie*

	Stedelijk vervoer	Interlokaal vervoer
Individueel personenvervoer (personenauto's)	Binnen scope	Binnen scope
Collectief personenvervoer (bussen)	Binnen scope	Binnen scope
Vrachtvervoer (bestel- en vrachtauto's)	Binnen scope	Binnen scope
Overig (scooters, (land)bouwvoertuigen e.d.)	Buiten scope	Buiten scope

Alle voertuigen vallend onder de categorie "Overig" worden vanwege hun diversiteit en geringere bijdrage aan de totale emissies binnen Nederland, in deze studie buiten beschouwing gelaten.

## 1.5 Opbouw rapport

In Hoofdstuk 2 wordt een schets gegeven van de omvang van de Nederlandse vervoersector, het aantal voertuigen en hun vervoersprestatie. Ook wordt kort ingegaan op de economische betekenis van de vervoersector.

In hoofdstuk 3 wordt beschreven welke emissies de Nederlandse vervoersector veroorzaakt en wat hun gevolgen zijn voor het milieu. De bijdrage van het wegverkeer aan deze emissies wordt aangegeven, inclusief toekomstige trends.

In hoofdstuk 4 wordt een literatuurstudie naar de resultaten van well-to-wheels studies gepresenteerd. De resultaten van verschillende studies worden ten opzichte van elkaar vergeleken. Voor een aantal geselecteerde voertuigcategorieën wordt aangegeven welke relatieve emissiereducties bereikt kunnen worden.

In hoofdstuk 5 wordt op basis van de resultaten van de voorgaande hoofdstukken een inschatting gemaakt wat het effect op de Nederlandse emissies zal kunnen zijn door de inzet van brandstofcelvoertuigen.

Tenslotte worden in hoofdstuk 6 de conclusies uit deze studie gepresenteerd.

## 2. OMVANG NEDERLANDSE VERVOERSECTOR

### 2.1 Inleiding

Alvorens iets gezegd kan worden over het totale energiegebruik en de emissies van de vervoerssector binnen Nederland, moet eerst bekend zijn wat de omvang, de afgelegde kilometers, het brandstofverbruik en typen emissies van deze sector zijn. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van deze punten. De daarvoor gebruikte gegevens zijn afkomstig uit een, binnen dit project uitgevoerde, literatuurstudie. Van de beschikbare gegevens aangaande de Nederlandse vervoerssector is steeds het meest recente jaar genomen.

### 2.2 Aantal motorvoertuigen

De meest hardnekkige milieuproblemen gerelateerd aan verkeer die bij uitvoering van het vastgestelde Nationale milieubeleid in 2020 resteren, zijn klimaatverandering en geluidhinder [RIVM (2000c)]. Beide problemen zijn rechtstreeks afhankelijk van enerzijds het toenemende gebruik van voertuigen en anderzijds de volumegroei. Ondanks de regeringsdoelstelling om de verkeersgroei te verminderen, gaat de groei van het verkeer bijna onverminderd door. In deze paragraaf wordt een chronologische weergave van het aantal voertuigen voor de diverse voertuigtypen binnen de vervoerssector gegeven.

#### 2.2.1 Personenauto's

Met personenauto's worden binnen deze studie voertuigen bedoeld die worden gebruikt voor individueel personenvervoer. Op basis van huidige brandstoffen voor de vervoerssector, zijn personenauto's onder te verdelen in drie categorieën: benzine, diesel en LPG. In Tabel 2 is het aantal personenauto's in Nederland gegeven.

Tabel 2: *Overzicht van het aantal personenauto's (x 1.000) in Nederland [CBS, 2001]*

	1990	1995	1998	1999	2000
Personenauto's (totaal)	5118	5581	5931	6120	6343
Benzine	3965	4596	4904	5051	5215
Diesel	571	608	663	718	797
LPG	582	376	364	351	331

Uit Tabel 2 valt af te leiden dat het totaal aantal personenauto's aanzienlijk gestegen is tussen 1990 en 2000. De stijging bedraagt 24% in 11 jaar, gemiddeld 2,2% per jaar. Daarnaast is duidelijk zichtbaar dat het aandeel benzineauto's, met 82% in 2000, de grootste categorie binnen de groep personenauto's vormt en dat het marktaandeel nog steeds aan het stijgen is (31 % in 11 jaar). Verder valt op dat het marktaandeel dieselauto's sterk is gestegen (bijna 40% in 11 jaar !) en daarmee over de afgelopen 10 jaar een groter groeipotentieel dan benzineauto's heeft gehad. Ook is duidelijk zichtbaar dat het aandeel auto's op LPG sterk is gedaald (57% in 11 jaar). Dit komt enerzijds vanwege het feit dat auto's op LPG pas rendabel worden bij een groot aantal jaarlijks afgelegde kilometers. Anderzijds wordt deze daling veroorzaakt doordat LPG-installaties meestal achteraf worden ingebouwd, waardoor een goede inpassing in het motormanagementsysteem lastig is en daardoor ten koste gaat van prestaties en emissieniveaus. Dit verklaart ook mede de toenemende populariteit van dieselauto's, in dit segment.

### 2.2.2 Bedrijfsauto's

Met bedrijfsauto's worden binnen deze studie voertuigen bedoeld die worden gebruikt voor klein en groot beroeps(goederen)vervoer en collectief personenvervoer. In Tabel 3 is het aantal bedrijfsauto's in Nederland gegeven. Het grootste aandeel van het totaal aantal bedrijfsauto's is afkomstig van de groep vracht- en bestelauto's. Met vrachtauto's worden in deze groep vrachtwagens met een vast laadruim bedoeld. Vrachtauto's met een separate oplegger worden trekkers genoemd. De categorie speciale voertuigen omvat onder meer brandweerauto's en vuilnisauto's, maar bijvoorbeeld ook kampeerauto's. De categorie autobussen omvat alle autobussen voor zowel lijndienst als niet-lijndienstvervoer. De verdeling van het totaal aantal autobussen over deze twee groepen is ruwweg 50/50 [CBS, 2001].

Tabel 3: *Overzicht van het aantal bedrijfsauto's (x 1.000) in Nederland [CBS, 2001]*

	1990	1995	1998	1999	2000
Bedrijfsauto's (totaal)	539	654	738	806	883
Vracht- en bestelauto's	469	578	649	710	779
Trekkers (voor oplegger)	33	41	49	53	57
Speciale voertuigen	26	24	30	33	36
Autobussen	11	11	11	11	11

Wat opvalt is de sterke stijging van het totaal aantal bedrijfsauto's tussen 1990 en 2000. De stijging bedraagt 64% in 11 jaar, gemiddeld 5,8% per jaar. Hiermee is de groep bedrijfsauto's de afgelopen 11 jaar sterker gegroeid dan groep personenauto's (24% in 11 jaar). Dit komt hoofdzakelijk door de explosieve groei van de categorie vracht- en bestelauto's, die de afgelopen 11 jaar 66% gegroeid is. Deze groei wordt met name veroorzaakt door de sterke toename van het aantal bestelauto's. Relatief gezien kan ook worden geconcludeerd dat de categorie trekkers sterk is toegenomen (73% in 11 jaar, gemiddeld 6,6% per jaar). Ook is in Tabel 3 duidelijk zichtbaar dat het aantal autobussen de afgelopen 11 jaar vrijwel constant is gebleven.

### 2.3 Afgelegde kilometers

In deze paragraaf wordt, vanaf het jaar 1990, voor de diverse voertuigtypen binnen de vervoersector een weergave gegeven van het jaarlijks afgelegde aantal kilometers. Tabel 4 geeft het totaal aantal afgelegde kilometers per jaar (vervoersprestatie) van de verschillende typen voertuigcategorieën.

Tabel 4: *Vervoersprestatie per type voertuig (x 1.000.000 km) in Nederland [CBS, 2001]*

	1990	1995	1998	1999 <sup>1)</sup>	2000
Personenauto's	81288	89973	-	97990	-
Bestelauto	7781	10975	-	15235	-
Vrachtauto	3782	3899	-	3746	-
Trekkers (voor oplegger)	2362	3018	-	3187	-
Speciale voertuigen	-	-	-	-	-
Autobussen	621	644	-	?	-

1)Jaar 1999-2000 cijfers uit andere bron binnen CBS dan jaar 1990-1998 cijfers

Uit een analyse van Tabel 3 en Tabel 4 kan worden geconcludeerd dat de explosieve groei van het aantal vracht- en bestelauto's (66% in 11 jaar), hoofdzakelijk moet zijn veroorzaakt door de toename van bestelauto's. De toename van het jaarlijks aantal gereden kilometers van de categorie bestelauto's bedraagt over de afgelopen 10 jaar (1990-1999) namelijk 96%!, terwijl dit voor de categorie vrachtauto's nagenoeg constant is gebleven. Voor de categorie speciale voertuigen zijn aangaande het jaarlijks aantal gereden kilometers geen gegevens beschikbaar.

## 2.4 Brandstofgebruik

In deze paragraaf wordt, vanaf het jaar 1990, voor de diverse voertuigtypen binnen de vervoersector een weergave gegeven van het jaarlijks energiegebruik. Tabel 5 geeft het totale energiegebruik van zowel geheel Nederland als de vervoersector, in termen van primaire energie voor de verschillende typen voertuigcategorieën.

Tabel 5: *Energiegebruik door de vervoersector (PJ) in Nederland [RIVM, 2001]*

	1990	1995	1998	1999	2000
Totaal Nederland	2702	2943	3024	2974	3145
Totaal Vervoersector <sup>1)</sup>	403	447	479	502	525
Wegverkeer	321	361	387	407	429
Personenauto's	214	238	246	258	268
Benzine	140	166	171	179	183
Diesel	40	44	52	58	64
LPG	34	28	23	22	21
Lichte bedrijfsvoertuigen	29	37	49	54	61
Zware bedrijfsvoertuigen	78	86	92	95	100

1) Inclusief spoorvervoer, binnenvaart, binnenlands vliegverkeer en mobiele werktuigen (tractoren e.d.)

Het energiegebruik van de totale vervoersector bedroeg 525 PJ in 2000, dit is circa 17% van het totale nationale primaire energiegebruik [ECN, 2000b]. Van deze 525 PJ voor de totale vervoersector komt 82% (429 PJ) voor rekening van het wegverkeer. 62% (268 GJ) van het totale energiegebruik van het wegverkeer komt voor rekening van personenauto's. De overige 38% (161 GJ) komt voor rekening van de groep bedrijfsauto's, en is dus voornamelijk diesel.

De groep personenauto's op benzine neemt met 68% (183 GJ) het grootste energiegebruik voor zijn rekening onder de categorie personenauto's. Dit komt omdat deze groep het grootst in aantal is (5.215.000 van in totaal 6.343.000 personenauto's, zie § 2.2). Ook is zichtbaar dat het energiegebruik door personenauto's op diesel de afgelopen 11 jaar is gestegen (62% in 11 jaar, gemiddeld 5,6 % per jaar) en dat het energiegebruik door personenauto's op LPG met een gelijke trend is gedaald. Ook dit hangt samen met respectievelijk een stijging en een daling van het aantal van deze voertuigen.

### 3. EMISSIES WEGVERKEER NEDERLAND

Bij het verbranden van de binnen het wegverkeer toegepaste brandstoffen worden er verschillende typen luchtverontreinigingen geëmitteerd naar de atmosfeer. Veel van deze emissies zijn schadelijk voor mens en milieu. Daarnaast is er ook nog een andere vorm van milieuvervuiling welke wordt veroorzaakt door slijtage van het wegdek, banden, remvoeringen, e.d. Hieronder wordt een omschrijving gegeven van veel voorkomende typen emissies en wat voor invloed zij hebben op het milieu. Vervolgens wordt een weergave gegeven van de omvang van de emissies welke worden veroorzaakt door het wegverkeer. Afgesloten wordt met een weergave van de te verwachte toekomstige emissies.

#### 3.1 Typen emissies

De door het wegverkeer veroorzaakte emissies zijn voornamelijk luchtverontreinigingen en geluid. Bodem- en waterverontreinigingen door het wegverkeer zijn dermate gering dat zij binnen deze studie buiten beschouwing worden gelaten. Luchtverontreinigingen zijn op basis van effecten die zij veroorzaken voor het milieu, onder te verdelen in 5 groepen. In Tabel 6 staat een overzicht van (nadelige) milieuaspecten die samenhangen met het wegverkeer.

Tabel 6: Milieueffecten van het wegverkeer

---

Luchtverontreinigingen:

- Broeikaseffect (klimaatverandering, o.a. door kooldioxide)
  - Zure depositie (o.a. zure regen)
  - Smogvorming (o.a. fotochemische luchtverontreiniging via ozonvorming)
  - Fijn stof en zware metalen
  - Geluid
- 

Binnen deze studie wordt, vanwege de geringe bijdrage binnen het gehele spectrum van emissies, geen aandacht besteed aan de uitstoot van zware metalen. Daarnaast wordt ook op het aspect geluid niet verder ingegaan. De overige luchtverontreinigingen zullen hieronder op basis van milieuaspect worden toegelicht.

##### 3.1.1 Broeikaseffect

Naast kooldioxide (CO<sub>2</sub>) zijn er meerdere gassen die het broeikaseffect veroorzaken. Dit betreft vooral distikstofoxide (N<sub>2</sub>O), methaan (CH<sub>4</sub>), ozon (O<sub>3</sub>), chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's), perfluorkoolwaterstoffen (PFK's), fluorkoolwaterstoffen (HFK's) en zwavelhexafluoride (SF<sub>6</sub>). Uitstoot van al deze stoffen in de atmosfeer leidt tot een stijging van de temperatuur (het broeikaseffect). Door het wegverkeer geëmitteerde broeikasgassen zijn hoofdzakelijk CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub>. Daarom worden de overige stoffen in deze studie buiten beschouwing gelaten.

*Kooldioxide (CO<sub>2</sub>)* wordt gevormd bij (volledige) verbranding van in de brandstoffen aanwezige koolwaterstoffen. Derhalve is de CO<sub>2</sub>-emissie direct gerelateerd aan het brandstofverbruik.

*Distikstofoxide (N<sub>2</sub>O, lachgas)* ontstaat vooral in de opwarmfase van driewegkatalysatoren bij onvolledige omzetting van NO<sub>x</sub> in stikstof. In verhouding tot CO<sub>2</sub> weegt bij een gelijke uitstoot van N<sub>2</sub>O de bijdrage aan het broeikaseffect 310 keer zwaarder. Hiermee is N<sub>2</sub>O dus een zeer sterk broeikasgas.

*Methaan (CH<sub>4</sub>)* ontstaat door onvolledige verbranding. In een verbrandingsmotor moet de verbranding in korte tijd plaatsvinden. Dat is een probleem op relatief koude plekken. Een klein deel van de brandstof verbrandt dus nooit. Hierdoor bevatten onbehandelde uitlaatgassen van een verbrandingsmotor altijd een zekere concentratie aan onverbrande koolwaterstoffen, en dus methaan. In verhouding tot CO<sub>2</sub> weegt bij een gelijke uitstoot van CH<sub>4</sub> de bijdrage aan het broeikas effect 21 keer zwaarder.

### 3.1.2 Zure depositie

Zure depositie wordt veroorzaakt door de uitstoot van twee stoffen, namelijk NO<sub>x</sub> (stikstofoxide) en SO<sub>2</sub> (zwaveldioxide). NO<sub>x</sub> en SO<sub>2</sub> zijn voornamelijk verbrandings emissies.

*Stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>)* worden in een verbrandingsmotor gevormd bij hoge temperatuur verbranding, waarbij stikstof uit de lucht chemisch wordt gebonden aan zuurstof. Dit proces vindt in ongeveer dezelfde mate plaats in benzine/LPG- en dieselmotoren. NO<sub>x</sub> ontstaat vooral onder invloed van een hoge motortemperatuur. NO<sub>x</sub> veroorzaakt verzuring en speelt daarnaast een rol bij smogvorming.

*Zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>)* wordt geëmitteerd vanwege de aanwezigheid van zwavel in brandstoffen. Naast het negatieve effect van verzuring heeft SO<sub>2</sub>, door zijn afkoelende werking, een aan het broeikas effect tegengestelde werking. Het terugdringen van de SO<sub>2</sub>-emissie kan dan ook het broeikas effect versterken.

### 3.1.3 Smogvorming

Smogvorming wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de uitstoot van een viertal stoffen, namelijk CO (koolmonoxide), VOS (vluchtige organische stoffen), C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> (koolwaterstoffen) en eveneens NO<sub>x</sub> (stikstofoxide, ook verzuring). In deze studie worden koolwaterstoffen, exclusief methaan, buiten beschouwing gelaten.

*Koolmonoxide (CO) en vluchtige organische stoffen (VOS)* ontstaan door onvolledige verbranding. Dit proces vindt vooral plaats bij motoren die benzine en LPG als brandstof gebruiken. Dit komt door de indirecte inspuiting van benzine en LPG, waardoor deze in contact komt met koude oppervlakken en volledige verbranding niet, binnen de gegeven korte tijd, kan plaatsvinden. Bij dieselmotoren wordt tegenwoordig wel veelvuldig directe inspuiting toegepast. CO is schadelijk voor de gezondheid. VOS is naast smogvormend in sommige gevallen ook kankerverwekkend. CO en VOS worden vooral in de bebouwde kom uitgeworpen. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door de manier van rijden (veel optrekken en afremmen) en anderzijds door het effect van een nog koude motor. Bij auto's met een katalysator is deze laatste oorzaak de belangrijkste, omdat bij een koude motor de katalysator nog niet werkt.

### 3.1.4 Fijn stof

Het inspuiten van brandstof in een hete omgeving heeft als nadeel dat de brandstof kan verkolen. Emissie van roet is het gevolg. Dit verschijnsel treedt met name bij dieselmotoren op. Sinds enige tijd worden nieuwe dieselmotoren ontworpen met een sterk verhoogde inspuitdruk, wat zorgt voor een fijnere brandstofnevel. Hierdoor neemt o.a. de hoeveelheid roet af. Echter, het gezondheidsrisico kan groter zijn. De roetdeeltjes worden namelijk kleiner, zijn moeilijker met een filter af te vangen en dringen na inademing dieper in de longen door.

*Fijn stof* wordt veelal gekarakteriseerd door de *PM10* (Particulate Matter 10) waarde; de hoeveelheid deeltjes met een afmeting beneden 10 µm. De emissie van fijn stof door de vervoersector ontstaat door verbranding van dieselolie (85%, 'zwarte walm') en door slijtageprocessen (10%). Fijn stof dringt diep door in de longen en is schadelijk voor de gezondheid.

## 3.2 Omvang emissies

### 3.2.1 Historisch emissies totale wegverkeer

Een historisch overzicht van de emissies van het wegverkeer gedurende de afgelopen 11 jaar is gegeven in Tabel 7. Hieruit blijkt dat voor alle emissies tussen 1990 en 2000 een aanzienlijke daling is bewerkstelligd, met uitzondering van de broeikasgassen CO<sub>2</sub> en N<sub>2</sub>O, die een aanzienlijke stijging vertonen.

Tabel 7: *Historische emissies van het wegverkeer [mln kg/jaar] (CBS, 2001)*

	1990	1995	1998	1999	2000
CO <sub>2</sub>	23438	26341	28257	29828	31385
NO <sub>x</sub>	257,8	207,9	178,6	176,5	174,7
CO	713,9	547	440,9	429,7	418,2
VOS	195,7	143,1	114,2	109,4	106,4
PM10	17,3	11,3	8,9	8,3	8,0
SO <sub>2</sub>	12,6	12,2	4,7	5,1	4,0
N <sub>2</sub> O	1,02	1,74	1,79	1,87	1,91

De toename van de uitstoot van CO<sub>2</sub> door het wegverkeer sinds 1990, is puur te wijten aan het toenemende totaal aantal voertuigen, de afname van voertuigen op LPG en de toename van voertuigen op diesel. Er kan dus geconcludeerd worden dat ondanks het feit dat interne verbrandingsmotoren in de loop der jaren efficiënter met brandstof omgaan, dit niet opweegt tegen de explosieve groei die het wegverkeer de afgelopen decennia heeft ondervonden (zie § 2.2). Hierbij dient echter wel vermeldt te worden dat ondanks dat het aantal voertuigkilometers tussen 1980 en 2000 met 67% is gestegen, de CO<sub>2</sub>-emissie in diezelfde periode 'maar' met circa 40% is toegenomen [CBS (2001)]. Dit verschil is dus wel voornamelijk te danken aan de afname van het gemiddelde energiegebruik per kilometer van personenauto's door verbeterde brandstof-efficiency. Hiernaast heeft ook het toegenomen aandeel van voertuigen op diesel een gunstig effect gehad.

Na een lichte stijging in de jaren '80 daalt de emissie van NO<sub>x</sub> vanaf 1990 door enerzijds het gebruik van driewegkatalysatoren (voor NO<sub>x</sub>, CO en VOS reductie) en anderzijds de toepassing van steeds schonere dieselmotoren. Dit laatste is vooral van belang bij zware bedrijfsvoertuigen. Ten opzichte van 1980 is de emissie van NO<sub>x</sub> door wegverkeer met 33% gedaald. Zeker 30% daarvan is gerealiseerd in de periode 1990-2000.

Naast het positieve effect van de driewegkatalysator op NO<sub>x</sub> reductie, is tevens zichtbaar dat het het afgelopen decennium een positief effect heeft gehad op de reductie van CO en VOS. De emissies van CO en VOS zijn sinds 1980 met respectievelijk 65% en 60% verminderd, onder invloed van de stapsgewijs aangescherpte Europese emissie-eisen voor de typekeuring van motorvoertuigen. Het zijn deze eisen die uiteindelijk hebben geresulteerd in de toepassing van driewegkatalysatoren bij personen- en bestelauto's op benzine en LPG. De VOS-verdampingsemissies zijn eveneens onder invloed van Europese eisen tussen 1990 en 1999 met een kwart verminderd door de toepassing van koolstoffilters in personenauto's.

De emissie van fijn stof (o.a. PM10) door het wegverkeer is in de periode 1980-1999 met 60% afgenomen. Ruim 45% daarvan is gerealiseerd in de periode 1990-1999. Dit komt voornamelijk door de toepassing van schonere dieselmotoren in zowel (zware) bedrijfsvoertuigen als personenauto's.

De emissie van SO<sub>2</sub> door het wegverkeer is sinds 1990 met 68% verminderd. Dit komt onder andere door wettelijke maatregelen waardoor het gebruik van laagzwavelige dieselolie (350 ppm) is afgedwongen. Ondanks het feit dat het aantal voertuigen op diesel de afgelopen decennia fors is toegenomen (zowel bij personenauto's als bij bedrijfsauto's), hebben deze wettelijke maatregelen dus een positief effect gehad.

De toename van N<sub>2</sub>O sinds 1990, is enerzijds te wijten aan de toename van het totaal aantal voertuigen en anderzijds aan het feit dat de afgelopen decennia de driewegkatalysator zijn intrede heeft gedaan, waarbij de reductie van NO<sub>x</sub> als bijproduct N<sub>2</sub>O oplevert (zie § 3.1.1).

### 3.2.2 'Actuele' emissies per type voertuig

In Tabel 8 staan de emissies door het wegverkeer onderverdeeld in de diverse voertuigcategorieën. Als uitgangspunt zijn de gegevens voor het jaar 1999 gebruikt.

Uit Tabel 8 wordt duidelijk dat qua emissies de belangrijkste categorie binnen het wegverkeer de personenauto's zijn. Alleen op de emissie van stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), fijn stof (PM10) en zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>), vindt binnen de categorie goederenvervoer meer uitstoot plaats. Dit komt voornamelijk omdat de categorie goederenvervoer hoofdzakelijk diesel als brandstof gebruikt.

Tabel 8: Verkeersemissies in 1999 (miljoen kg) in Nederland [RIVM 2000]

	Kool- monoxide	VOS <sup>1)</sup>	Stikstof- oxiden	Fijn stof <sup>2)</sup>	Zwavel- dioxide	Broeikasgassen		
						Kool- dioxide <sup>3)</sup>	Methaan	Distikstof- oxide
Totaal Nederland	712	290	422	38	103	179.728	1.038	52
Totaal Wegverkeer	401	103	170	13	5,1	29.800	4,2	5,0
Voertuigen voor personenvervoer	361	90	79	5,9	2,0	19.300	3,7	3,2
Personenauto's	316	71	73	5,1	1,8	18.500	2,9	3,1
Motortweewielers	32	9,1	0,4	0,19	0,01	221	0,36	0,00
Bromfietsen	11	9,2	0,1	0,05	0,00	66	0,33	0,00
Autobussen	1,7	1,2	5,8	0,52	0,16	534	0,05	0,12
Voertuigen voor goederenvervoer	39	12	88	6,9	3,0	10.200	0,50	1,8
Bestelauto's	26	6,4	21	3,7	1,2	4.130	0,27	0,42
Vrachtauto's	6,0	2,9	27	1,6	0,90	2.960	0,12	0,55
Trekker (met oplegger)	6,4	2,8	40	1,5	0,93	3.060	0,11	0,80
Speciale voertuigen <sup>4)</sup>	1,3	0,56	2,8	0,22	0,10	325	0,02	0,05

<sup>1)</sup> Vluchtige organische stoffen exclusief methaan, inclusief verdamping uit brandstofsysteemen.

<sup>2)</sup> Diameter kleiner dan 10 µm (PM10), incl. emissies door slijtage van banden en wegdek.

<sup>3)</sup> Niet-temperatuur gecorrigeerd.

<sup>4)</sup> Bedrijfsvoertuigen voor bijzondere doeleinden, zoals brandweerauto's, takelwagens en reinigingsauto's.

Wat ook uit Tabel 8 afgeleid kan worden is dat de emissie van CO door het wegverkeer, meer dan de helft bedraagt (56%) van de totale CO-emissie in Nederland. Hiervoor is hoofdzakelijk de categorie personenauto's, met 51 van de 56%, verantwoordelijk. Dit zijn hoofdzakelijk de personenauto's op benzine (zie § 3.1.3). Emissies door het wegverkeer welke eveneens een substantieel deel van de totale Nederlandse emissie vormen zijn: NO<sub>x</sub> (40%), VOS (36%), fijn stof (34%) en CO<sub>2</sub> (17%). Hekensluiters vormen N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> met respectievelijk 10%, 4% en 0,4%.



### 3.3 Toekomstige ontwikkelingen

In diverse RIVM rapporten (RIVM, 2000a) (RIVM, 1997) (RIVM, 2000b; RIVM, 2000c) worden de belangrijkste bevindingen voor wat betreft de toekomstige milieubelasting door verkeer en vervoer geïnventariseerd. De belangrijkste conclusies in dit kader worden hieronder weergegeven.

#### 3.3.1 Omvang van de vervoerssector

De meest hardnekkige milieuproblemen gerelateerd aan verkeer die, bij uitvoering van het vastgestelde milieubeleid, in 2020 zullen resteren zijn klimaatverandering en geluidhinder. Beide problemen zijn rechtstreeks afhankelijk van het gebruik van voertuigen en hiermee de volumegroei. Ondanks de regeringsdoelstelling om de verkeersgroei te verminderen, gaat de groei van het verkeer bijna onverminderd door. Bij het vastgestelde beleid neemt het personenautogebruik in de periode 1995-2020 met circa 50% toe. De toename tussen 1986 en 2010 bedraagt ca. 65%; dat is meer dan de regeringsdoelstelling uit het NMP3 met maximaal 35%. Het vrachtwagengebruik neemt bij vastgesteld beleid tussen 1995-2020 toe tussen de 115% (EC-scenario) en 160% (GC-scenario) toe. De toename in de periode 1986-2010 bedraagt 110% tot 130% en is daarmee aanzienlijk hoger dan de regeringsdoelstelling uit het NMP3 (maximaal 40% toename) [RIVM (2000c)].

#### 3.3.2 CO<sub>2</sub> emissies

De CO<sub>2</sub> emissie van het totale Nederlandse wegverkeer zal bij het thans vastgestelde beleid in de periode 1995-2020 met circa 35 tot 55% toenemen. Momenteel is ruim 60% van de CO<sub>2</sub> emissie van de sector verkeer en vervoer afkomstig van personenauto's. Alhoewel dit aandeel af zal moeten nemen (tot circa 40% in 2020), blijft het personenautoverkeer de grootste emissiebron binnen de sector. In de periode 2000-2020 zal de CO<sub>2</sub> emissie van personenauto's stabiliseren of neemt met maximaal 20% toe, ondanks een toename in het autogebruik met ca. 40% in deze periode. De CO<sub>2</sub> emissie van vrachtwagens zal volgens het EC-scenario (het 'European Coordination' scenario, een macro-economisch energiescenario) tussen 1995 en 2020 verdubbelen.

In de periode 1995-2000 is het personenautopark gemiddeld 12% zuiniger geworden. In de periode 1995-2020 wordt een verdere verbetering verwacht van 20 tot 30%. Indien sinds 1980 geen rendementsverbeteringen zouden zijn opgetreden dan zou naar verwachting de extra verhoging van CO<sub>2</sub> emissies door personenauto's per 2020 55% hoger uitvallen. De CO<sub>2</sub> emissie van vrachtauto's en trekkers (vrachtvoertuigen) zou in 2020 ruwweg 25% hoger zijn indien er geen brandstofefficiencyverbetering en logistieke efficiencyverbetering (verschuiving naar grotere vrachtauto's) zal optreden. Het is de verwachting dat de bijdrage van de brandstofefficiencyverbetering aan de CO<sub>2</sub>-emissiereductie in 2020 circa 55% is, de bijdrage van de logistieke efficiencyverbetering circa 45%.

#### 3.3.3 NO<sub>x</sub> emissies

Momenteel komt ruwweg 60% van de totale Nederlandse NO<sub>x</sub>-emissie voor rekening van de sector verkeer en vervoer. Dit aandeel zal in de toekomst ongeveer gehandhaafd blijven. De NO<sub>x</sub>-emissies van personenauto's neemt bij het vastgestelde beleid in de periode 1995-2020 met circa 85% af. De reden is het vrijwel geheel verdwijnen van auto's (benzine en LPG) zonder katalysator en de technologische verbetering van interne verbrandingsmotoren. Bovendien zullen de verdere aanscherpingen van de Europese emissie-eisen aan nieuwe personenauto's (alle brandstofsoorten) een verdere daling van de NO<sub>x</sub>-emissie tot gevolg hebben.

Het is de verwachting dat volgens het EC-scenario de NO<sub>x</sub>-emissie van vrachtwagens in de periode 1995-2020 met circa 55% afneemt. De reductie van NO<sub>x</sub>-emissie door vrachtoertuigen is vooral het effect van motortechnische verbeteringen en voor- en nabehandelinginstallaties (circa 90% van de reductie), de bijdrage van de logistieke efficiencyverbetering is circa 10%.

De NO<sub>x</sub>-emissiedoestelling uit het NMP3 voor het wegverkeer, wordt naar verwachting niet gehaald. In 2010 wordt een emissie van circa 72 kton verwacht (doelstelling was 65 kton). Na het uitkomen van de Milieuverkenningen 5 (MV5) is het beleidsvoornemen geuit om de NO<sub>x</sub>-emissiedoelstelling van het wegverkeer te stellen op 150 kton in 2010. Om dit te halen zijn nog extra inspanningen nodig ten opzichte van de beleidsvoornemens uit het EC-scenario.

#### 3.3.4 VOS emissies

De VOS emissie daalt snel onder invloed van de aanscherpingen van de emissiefactoren. In 2020 zal de emissie nog ca. 30% van de emissie in 1995 moeten zijn. Bij het vastgestelde beleid neemt de VOS emissie van personenauto's in de periode met 1995-2020 met ca. 75% af en die van vrachtverkeer met ca. 70%. Het is de verwachting dat de VOS emissiedoelstellingen voor 2010, voor zowel personenauto's als vrachtverkeer, worden gehaald.

#### 3.3.5 Fijn stof emissies

Fijn stof is een van de belangrijkste stoffen die gezondheidsschade tot gevolg heeft. Het is de verwachting dat de PM10 emissie, ten gevolge van verbranding, snel zal dalen onder invloed van de aanscherpingen van de emissiedoelstellingen. In 2020 zal conform het EC-scenario de totale (dus zowel mobiel als stationair) PM10 emissie nog 40% van de emissie in 1995 bedragen. Bij het wegverkeer zal de emissie snel dalen: circa 80% in de periode 1995-2020. Na 2020 zal de emissie van PM10 weer stijgen. Fijn stof komt namelijk niet alleen vrij bij verbranding maar ook bij slijtage van wegdek en banden.

#### 3.3.6 N<sub>2</sub>O emissies

N<sub>2</sub>O emissies door het wegverkeer zullen afnemen door zowel verbeterde katalysatoren als NO<sub>x</sub>-emissiereductie. De relatieve bijdrage van N<sub>2</sub>O in de totale broeikasemissies door het wegverkeer zal ongeveer 5% blijven.

#### 3.3.7 SO<sub>2</sub> emissies

Het zwavelgehalte van brandstoffen in het wegverkeer is genormeerd. In 1998 is in EU verband besloten de normen voor brandstoffen voor het wegverkeer verder aan te scherpen. Deze aanscherpingen zullen, samen met de verbetering van de brandstofefficiëntie in het wegverkeer, zorgen voor een halvering van de totale zwavelemissie van het verkeer in de periode tussen 1995 en 2020. Tussen 1980 en 1995 is de totale zwavelemissie van verkeer vrijwel constant gebleven, ondanks de toename van het verkeersvolume. Na het uitkomen van de MV5 bedraagt de SO<sub>2</sub> emissiedoelstelling voor het wegverkeer 13 kton in 2010. Uitgaande van het EC-scenario kan dit doel gehaald worden.

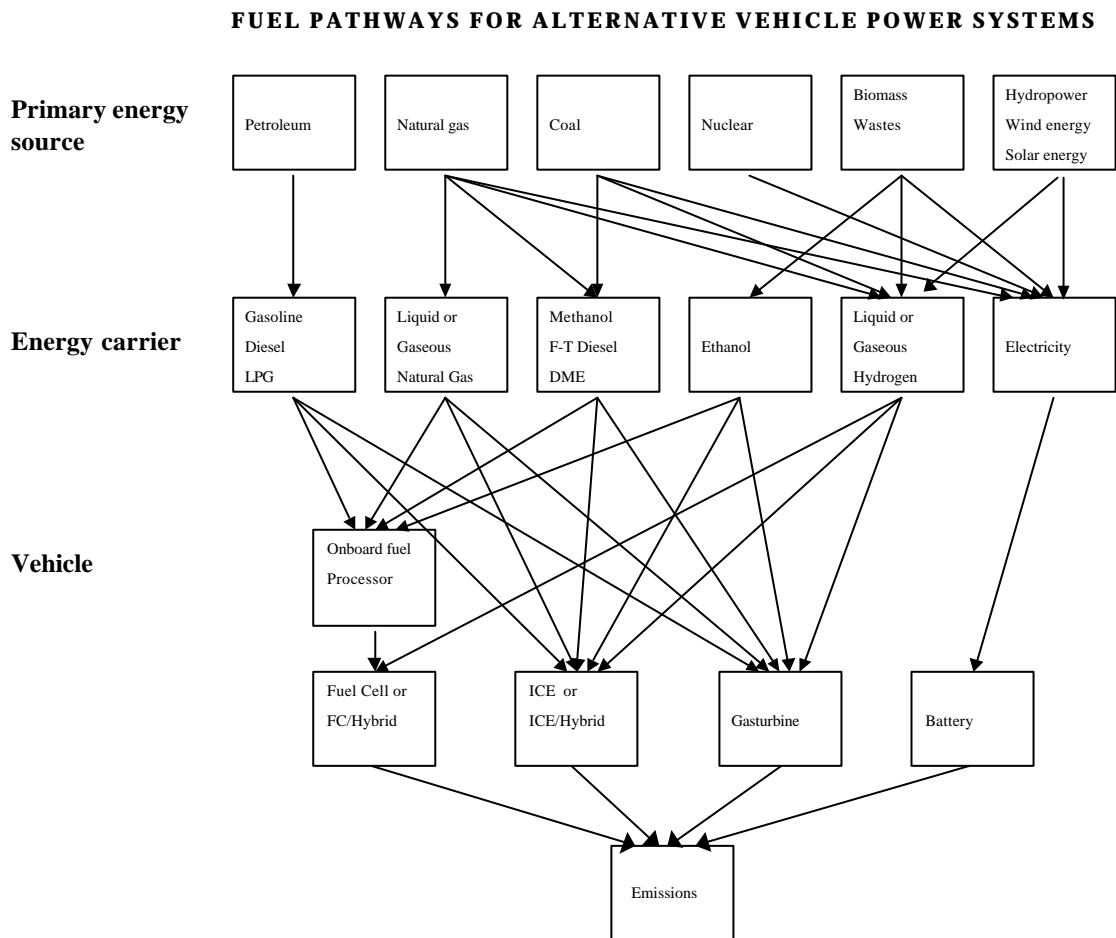
## 4. WELL-TO-WHEELS IN DE LITERATUUR

Deze studie heeft als doelstelling om het energieverbruik en de emissies in Nederland te kwantificeren wanneer brandstofcellen in plaats van interne verbrandingsmotoren worden toegepast als krachtbron voor het wegverkeer. Om dit te bewerkstelligen is het noodzakelijk om een ketenanalyse uit te voeren. Deze ketenanalyse, aangeduid als “well-to-wheels” analyse, beslaat het gehele traject van primaire energiebron tot en met het uiteindelijke gebruik van de geproduceerde brandstof door het te analyseren voertuig.

### 4.1 Inleiding well-to-wheels

#### 4.1.1 Energieketens

Om de milieuaspecten van brandstofcelvoertuigen te beoordelen moet niet enkel het voertuig zelf, maar moet de gehele keten van primaire energiebron tot aan de vervoersbehoefte beschouwd worden. Er zijn vele combinaties van alternatieve brandstoffen en voertuig(aandrijf)technologieën mogelijk die een oplossing zouden kunnen bieden voor problemen of knelpunten in het huidige wegverkeer, welke zijn gerelateerd aan het gebruik van fossiele brandstoffen. Een overzicht van mogelijke combinaties is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Overzicht van mogelijke brandstofroutes in combinatie met typen krachtbronnen

Uit Figuur 1 wordt al snel duidelijk dat er een groot aantal mogelijke ketens zijn te onderscheiden. Om een juiste keuze te maken tussen de verschillende opties, is het noodzakelijk een goed overzicht te hebben van de voor- en nadelen van de gekozen ketens en van toepasbare alternatieven. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van “well-to-wheels” analyses. Een well-to-wheels analyse is een methode voor het maken van inschattingen voor primair energiegebruik en emissies over de gehele brandstofketen.

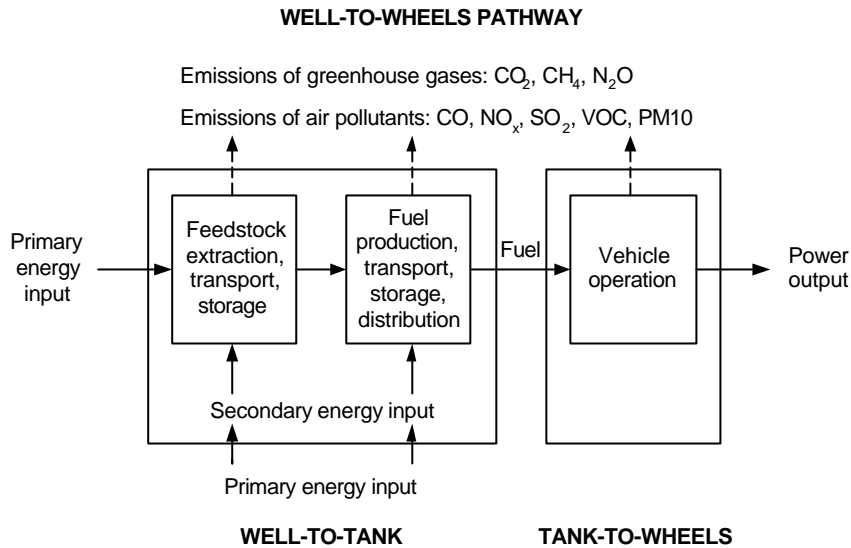
Uit de binnen dit project uitgevoerde literatuurstudie wordt echter duidelijk dat ook binnen het grote aantal mogelijke ketens talloze varianten zijn te onderscheiden. Deze varianten, welke op verschillende niveaus binnen Figuur 1 voorkomen, worden veroorzaakt door onder andere:

- Verschillende mogelijkheden om vanuit een bepaalde energiebron een brandstof te produceren (er zijn bijvoorbeeld diverse alternatieven om uit biomassa en aardgas waterstof te produceren);
- De locatie of schaal waarop de brandstoffen worden geproduceerd (mogelijkheden zijn bijvoorbeeld: direct bij winning van de primaire bron, centraal grootschalig in land van gebruik of decentraal kleinschalig) in combinatie met de wijze van transport en distributie van primaire bronnen en brandstoffen (tanker, schip, pijpleiding, vrachtauto);
- Verschil in specificatie van de secundaire brandstof (bijvoorbeeld: druk van gecompriëerde waterstof, zwavelgehalte brandstof, e.d.);
- Het grote aantal fundamenteel van elkaar verschillende type krachtbronnen dat binnen de hoofdcategorieën in Figuur 1 is te onderscheiden. Zo zijn interne verbrandingsmotoren onder te verdelen in Otto-motoren en Diesel-motoren, maar is verdere onderverdeling mogelijk naar bijvoorbeeld cilinderinhoud, wel of geen directe insputting, multi-kleppen technologie, variabele kleptiming, etc.);
- Het grote aantal typen voertuigen dat is te onderscheiden. Zo is, zoals aangetoond in hoofdstuk 2, onderscheid te maken tussen personenauto's, bestelauto's, vrachtauto's en bussen. Maar elk van deze categorieën kan nog weer worden onderverdeeld in duidelijk van elkaar te onderscheiden subcategorieën;
- Het grote aantal voertuigconfiguraties dat mogelijk is. Dit betreft niet alleen de combinatie type voertuig en type krachtbron, maar betreft bijvoorbeeld ook de mate van hybridisatie (bijvoorbeeld motoren in serie of parallel en de manier waarop de batterij wordt gebruikt – uitputten en vervangen of continu opladen tijdens rijden). Bovendien is onderscheid mogelijk naar het type transmissie dat wordt gebruikt om het vermogen dat door de krachtbron wordt geleverd over te brengen op de wielen (bijvoorbeeld: handgeschakelde-, automatische- of continu variabele transmissie en, in het geval van een elektromotor, directe aandrijving).

#### 4.1.2 Well-to-wheels analyse

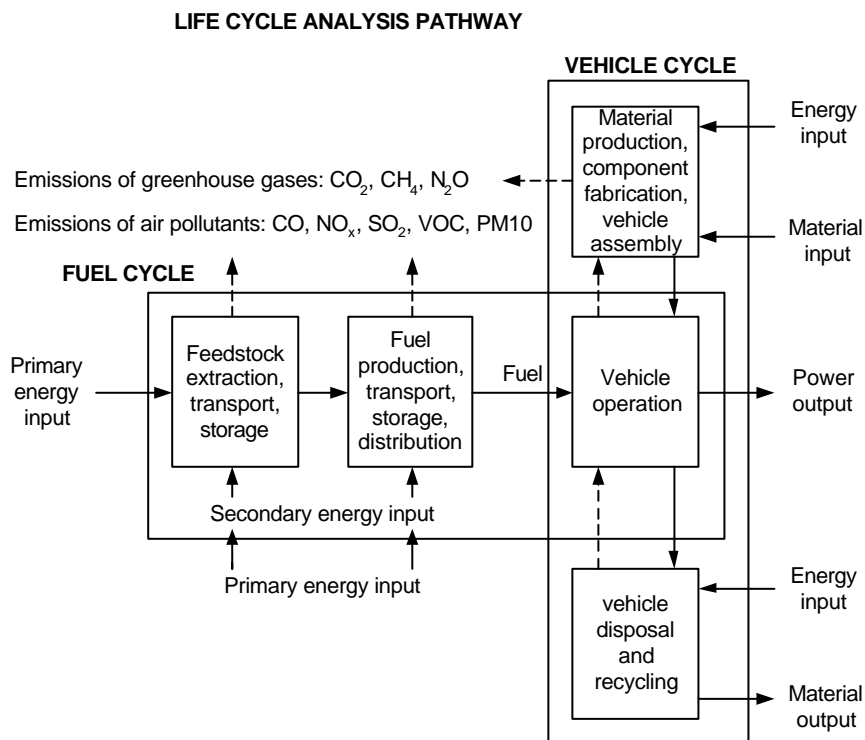
De centrale vraag welke uit de voorgaande paragraaf naar voren kwam is: Hoe te kiezen tussen de verschillende opties. Hiervoor is het noodzakelijk een goed overzicht te hebben van de voor- en nadelen van de alternatieven. Figuur 2 geeft een schematische weergave van een well-to-wheels keten. Uit het schema wordt duidelijk dat binnen een well-to-wheels analyse onderscheid is te maken tussen een well-to-tank deel en een tank-to-wheels deel. Het eerste deel betreft brandstofproductie, transport, opslag en distributie en is voertuigonafhankelijk. Het tweede deel betreft brandstofverbruik tijdens het voertuigbedrijf en is dus voertuigspecifiek.

Bij een well-to-wheels analyse worden de installaties en infrastructuren die nodig zijn voor winning, productie, transport en opslag van primaire energiebronnen en brandstoffen als aanwezig verondersteld.



Figuur 2: Schematische weergave van een well-to-wheels keten

Ook het materiaalgebruik, energiegebruik en de emissies die gepaard gaan met de productie van voertuigonderdelen, het assembleren van voertuigen en het verwerken van voertuigen in de afvalfase vormen *geen* onderdeel van een well-to-wheels analyse. Deze zaken vormen wel onderdeel van de levenscyclus analyse (LCA) van voertuigen. De relatie van een levenscyclusanalyse met een well-to-wheels analyse is schematisch weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3: Schematische weergave van een LCA voor voertuigen, exclusief 'infrastructure cycle'

Voor het evalueren van de verschillende opties voor aandrijving van voertuigen zouden zowel de brandstofketen als de voertuigketen moeten worden beschouwd. In veel gevallen zal de inzet van alternatieve brandstoffen of geavanceerde voertuigtechnologieën namelijk tot veranderingen

leiden in zowel het voortraject van brandstofproductie als bij de productie van materialen en voertuigen. De recente studie van MIT (Weiss, 2000) is een voorbeeld van een studie waarin ook de voertuigketen is beschouwd. Uit de resultaten komt naar voren dat het totale energiegebruik en de broeikasgasemissie in de productie- en afvalfase slechts weinig variëren, en ongeveer een factor 5 tot 10 kleiner is dan in de brandstofketen. De absolute waarden en onderlinge verhoudingen zijn echter sterk afhankelijk van de brandstof/voertuig-configuratie die wordt beschouwd en aannamen met betrekking tot levensduur en het gemiddeld aantal jaarlijkse kilometers van het voertuig.

## 4.2 Geraadpleegde literatuur

Er zijn talloze studies en publicaties die het onderwerp well-to-wheels analyse behandelen. Echter, na intensieve bestudering is gebleken dat veel van deze studies geen brandstofcelvoertuigen behandelen en dus minder interessant zijn voor deze studie. Daarnaast zijn er veel studies die slechts bepaalde onderdelen van de totale well-to-wheels keten behandelen, en daarmee wel kunnen bijdragen aan een well-to-wheels analyse maar geen totaalbeeld geven. Evaluaties van een aantal recente en uitgebreide well-to-wheels studies zijn te vinden in de studies van Wang (Wang, 1999a) en Ecotrafic (Ahlvik, 2001). Een overzicht van veel geciteerde en recente publicaties aangaande well-to-wheels studies, is weergegeven in bijlage B.

Tabel 9: *Beschikbaarheid van data in geraadpleegde literatuurbronnen.*

	Reference	Vehicle type	CO <sub>2</sub> eq	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	#combinations
(Hart, 1997)	ETSU Env.Chars.of FC's	psc bus	abs	abs	abs	Nodat	7
(Wang, 1999b)	GREET 1.5 Transportation Fuel-Cycle Model	Psc ldt	rel/abs	abs	abs	abs	>124
	factsheet Fuel cell BUS	Psc	nodat	nodat	nodat	nodat	1
(Hörmandinger, 1996)	PII: S1361-9209(96)00008-9	Psc	nodat	nodat	nodat	nodat	2
	California clean air initiatives	-	-	-	-	-	-
	Development of A fuel cell power source for a bus	Bus	nodat	nodat	nodat	nodat	1
	Neue Antriebe und energie trager	-	-	-	-	-	-
	Fuel cell systems for Vehicle applications	Psc	nodat	nodat	nodat	nodat	1
(Knorr, 1997)	The MAN Hydrogen Propulsion system \for buses	Bus	nodat	nodat	nodat	nodat	0
	Heavy duty vehicles: alt fuels and exhaust Emissions	Ldt	nodat	nodat	nodat	nodat	0
(DeCicco, 1994)	Improving automotive efficiency	Psc	nodat	nodat	nodat	nodat	0
(Rohland, 1992)	Hydrogen and FC -The clean energy system	-	-	-	-	-	-
(Chase, 1995)	The Future Fuels for Urban Transportation - Env.sustainable options	-	-	-	-	-	-
(Hart, 2001)	Environmental benefits of transports and stationary fuel cells	Psc bus	-	-	-	-	7
(Schurig, 2001)	Analyse v. Kraftstoffketen	Bus	Nodat	rel	rel	rel	3
	Environmental Performances of Fuel Cell Vehicles	-	-	-	-	-	-
(Albert Sobey and Associates, 2001)	Research and development of PEMFC systems for transportation applications	-	-	-	-	-	-
(Weiss, 2000)	On the road in 2020	Psc	abs	nodat	nodat	nodat	12
(Pembia, 2000)	Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Psc	abs	nodat	nodat	nodat	6
(Wallace, 2001)	Well-to-Wheel Energy Use	Ldt	abs	nodat	nodat	nodat	27
(Ogden, 2001)	A comparison of H2, MeOH and gasoline	Psc	nodat	nodat	nodat	nodat	3
(NREL, 2002)	Advisor3.2 vehicle simulation program	Psc					>0
	psc=pass.car		nodat = no emission data				
	ldt=light duty truck		rel = relative emission				
	bus=busses		abs = absolute emission				

Deze studie beperkt zich tot rapporten en publicaties die volledige well-to-wheels ketens hebben geanalyseerd, waarbij de aandacht speciaal uitging naar die studies welke binnen deze ketens brandstofcelvoertuigen behandelden. In Tabel 9 staan de publicaties welke voor deze studie zijn geraadpleegd. Slechts een deel van deze studies is daadwerkelijk als bron voor resultaten gebruikt, te weten: (Hart, 1997), (Wang, 1999b), (Weiss, 2000), (Pembia, 2000) and (Wallace, 2001). Dezelfde studies zijn vetgedrukt weergegeven in bijlage B Tabel 9 geeft tevens een overzicht van de aard van de in de literatuur gepubliceerde data. Hieruit blijkt dat van de geraadpleegde literatuur over alternatieve aandrijving, slechts een klein deel volledige well-to-wheels emissiedata geeft. Verder blijkt dat de emissiedata zich veelal beperken tot CO<sub>2</sub>.

### 4.3 Technologische opties

Een aantal algemene bevindingen met betrekking de geraadpleegde literatuur zal hieronder worden samengevat. De bevindingen zijn gerangschikt volgens stappen waaruit een well-to-wheels keten is opgebouwd, namelijk het well-to-tank en het tank-to-wheels gedeelte.

#### 4.3.1 Well-to-tank

Bij het uitvoeren van well-to-wheels studies is het tijds kader zeer belangrijk. Dit geldt met name voor het well-to-tank deel. Het is te verwachten dat de veranderingen aan de well-to-tank zijde langzamer verlopen, daar het hier veelal veranderingen aan de infrastructuur betreft. Bij het tank-to-wheels deel zijn voornamelijk de voertuigspecifieke onderdelen binnen deze keten aan verandering onderhevig.

##### 4.3.1.1 Primaire energiebronnen – winning, transport en opslag

Voor wat betreft fossiele bronnen is er een omvangrijke reserve aan steenkool en een aantal aardolieachtige bronnen (bitumen, ‘tar-sands’, ‘oil shales’) die zouden kunnen dienen als grondstof voor motorbrandstoffen wanneer de conventionele aardolie bronnen uitgeput raken. Deze bronnen bevatten echter meer koolstof en zijn dus waterstofarmer. Hiernaast zijn ze meer verontreinigd en duurder om te verwerken. Daarom richt de aandacht zich voornamelijk op het waterstofrijke aardgas. Aardgas is een bron die een vergelijkbare, zo niet grotere (denk aan: gas-hydraten), omvang heeft als aardolie, maar tot op heden veel minder wordt benut als primaire energiebron voor de productie van logistieke brandstoffen.

Slechts weinig geïndustrialiseerde regio's beschikken over voldoende aardgas uit eigen bronnen, zeker wanneer het ook op grote schaal in de transportsector moet worden ingezet. De scenario's met aardgas als voornaamste grondstof veronderstellen daarom meestal import van aardgas afkomstig uit zogenaamde ‘remote gas fields’. Transport van dit gas door pijpleidingen over lange afstand is dikwijls technisch wel uitvoerbaar maar economisch vaak niet haalbaar. Oplossing voor dit probleem is het ter plekke omzetten van het aardgas naar goedkoper te transporteren vloeibare brandstoffen.

Hernieuwbare bronnen zoals zon, wind en waterkracht worden in de meeste studies slechts kort aangestipt als mogelijke bron voor waterstof (middels elektrolyse) maar worden, op basis van de hoge kosten die hier vooralsnog aan verbonden zijn, vaak niet in de analyses meegenomen. De enige hernieuwbare bron die regelmatig in de analyses wordt meegenomen is biomassa. Biomassa wordt voornamelijk gezien als bron voor de productie van methanol en ethanol.

Hernieuwbare bronnen zijn in deze studie *niet* meegenomen.

De binnen de geraadpleegde literatuur aangetroffen conventionele (fossiele) primaire energiebronnen zijn:

- Aardolie
- Aardgas
- LPG

Enkele studies kenmerken flare-gas als primaire energiebron. Ook wordt in sommige gevallen een mix van bovenstaande primaire energiebronnen genomen.

Voor elektriciteit (als hulpvermogen bij de productie van secundair brandstoffen) wordt de brandstofmix van de elektriciteitssector binnen de desbetreffende studie genomen (veelal USA of Californië).

#### 4.3.1.2 Secundaire brandstoffen – productie, transport, opslag en distributie

De belangrijkste secundaire brandstoffen die, ter vervanging van de huidige logistieke brandstoffen, in de verschillende studies worden beschouwd zijn:

- Gecomprimeerd aardgas (CNG)
- Vloeibaar aardgas (LNG)
- Gasvormig waterstof ( $\text{GH}_2$ )
- Vloeibaar waterstof ( $\text{LH}_2$ )
- Methanol (MeOH)
- Fisher-Tropsch diesel (FT-diesel)
- Dimethylether (DME)
- Electriciteit

Daarnaast worden nog secundaire brandstoffen uit biomassa als DME, methanol (MeOH) en ethanol (EtOH) beschouwd. Ook worden mengsels van brandstoffen aangetroffen, zoals FT-diesel met conventionele diesel.

Als referentie wordt in het algemeen benzine of diesel gebruikt, waarbij voor een eerlijke vergelijking wordt uitgegaan van toekomstige kwaliteiten voor beide brandstoffen. In het algemeen betekent dit een laag zwavel gehalte. Daarnaast betekent dit voor benzine een laag benzeen gehalte en voor diesel een laag gehalte polycyclische aromaten.

Transport van vloeibare brandstoffen naar het opslag- en distributiepunt (tankstation), wordt algemeen verondersteld plaats te vinden per tankauto. Voor gasvormige brandstoffen verloopt dit meestal via pijpleidingen onder relatief lage druk. Brandstoffen die in gasvormige toestand worden gedistribueerd dienen dan ter plaatse te worden gecomprimeerd om voldoende brandstof in een voertuigtank te kunnen krijgen.

Naast centrale productie van brandstof gevolgd door transport naar het distributiepunt, wordt voor waterstof ook veelvuldig de optie decentrale productie, dus productie op het distributiepunt, meegenomen. Mogelijkheden voor decentrale productie die worden beschouwd zijn elektrolyse van water en omzetting van aardgas of vloeibare brandstoffen (zoals benzine, diesel en methanol) door middel van reforming of partiële oxidatie.

#### 4.3.2 Tank-to-wheels

Zoals in § 4.3.1 vermeld, is bij het uitvoeren van well-to-wheels studies het tijds kader zeer belangrijk. Dit geldt met name voor het tank-to-wheels deel, omdat de technologische ontwikkelingen (en dus veranderingen) op korte termijn juist daar liggen (denk aan; krachtbron, transmissie, e.d.). Gebleken is dat de meeste studies een tijds kader van 2005 tot en met 2020 hebben. Waardoor het kader veelal State-of-the-Art Otto- en Dieselmotoren, hybride-aandrijving en brandstofcellen beslaat.



Daarnaast is ook de manier waarop binnen de diverse studies het toekomstige tank-to-wheels deel met het conventionele tank-to-wheels deel wordt vergeleken van groot belang. Veel studies geven een vergelijking van toekomstige aandrijftechnieken ten opzichte van huidige (conventionele) aandrijftechnieken, zonder daarbij rekening te houden met de toekomstige ontwikkelingen van de huidige aandrijftechnieken. Hierdoor kan het dus gebeuren dat een technologie uit het jaar 2020 wordt vergeleken met een concurrerende technologie op basis van het jaar 2000.

In deze studie zijn de tank-to-wheels ketens uit de literatuur gekarakteriseerd naar drie eigenschappen, te weten:

- Krachtbron (prime-mover);
- Transmissie (drive train);
- Voertuigtype.

Hierop zal achtereenvolgens beknopt worden ingegaan.

#### 4.3.2.1 Krachtbron

De meeste studies voorzien in de toekomst voor zowel Otto- als Dieselmotoren aanzienlijke verbeteringen. Echter, verder dan deze vermelding komen de ze niet. De focus van de meeste studies ligt hoofdzakelijk op brandstofcelvoertuigen en brandstofomzetters (fuel processors) voor alternatieve en, zij het in mindere mate conventionele, brandstoffen.

Krachtbronnen zoals aangetroffen binnen de geraadpleegde literatuur, zijn onder te verdelen in de volgende klassen:

- *Mechanische aandrijving:*
  - ICE (Internal Combustion Engine, interne verbrandingsmotor), onderverdeeld in subtypen: SI (spark ignition), SIDI (spark ignition direct injection), CI (compression ignition), CIDI (compression ignition direct injection).
- *Elektrische aandrijving door elektromotor:*
  - Brandstofcel, doorgaans PEMFC, maar ook PAFC;
  - Accu, batterij.
- *Hybride aandrijving:*
  - Zowel de ICE als de brandstofcel kunnen gecombineerd worden met een accu tot een hybride elektrische aandrijving.

#### 4.3.2.2 Transmissie

In een groot deel van de referenties wordt de transmissie niet gespecificeerd. Gespecificeerde transmissies zoals aangetroffen binnen de geraadpleegde literatuur, zijn onder te verdelen in de volgende klassen:

- *Koppeling:*
  - Handmatig
  - Automatisch
  - Directe aandrijving
- *Versnelling:*
  - Handmatig
  - Automatisch
  - CVT (continu variabele transmissie)

#### 4.3.2.3 Voertuigtype

Ook een zeer belangrijk aspect binnen de tank-to-wheels keten is het voertuigtype, en dan met name het soort voertuig (voertuigklasse), gewicht, toepassingsgebied e.d. Het moge duidelijk zijn dat voertuiggewicht en toepassingsgebied sterk gecorreleerd zijn aan de voertuigklasse.

Echter, aangaande de karakteristieken van de, binnen de literatuur, geanalyseerde type voertuigen binnen één voertuigklasse, kan geconcludeerd worden dat iedere auteur deze karakteristieken anders definieert. Hierop wordt bij de analyse van de resultaten (§ 4.5.3) verder ingegaan.

Voertuigklassen zoals aangetroffen binnen de geraadpleegde literatuur, zijn onder te verdelen in de volgende categorieën:

- Passenger car
- Light (duty) truck (LDT)
- Bus

#### 4.4 Definitie categorieën

Om de meerwaarde van brandstofcelvoertuigen voor emissiereductie, ten opzichte van conventionele voertuigen, aan te tonen is de karakterisering van de well-to-wheels ketens (zoals aangegeven in § 4.3) te gedetailleerd voor een onderlinge vergelijking. De literatuur is daarom in dusdanige categorieën ondergebracht, dat de meerwaarde van brandstofcelvervoer in Nederland in algemene termen onderzocht kan worden.

Het ligt voor de hand in eerste instantie onderscheid te maken tussen voertuigaandrijving door middel van een interne verbrandingsmotor en een brandstofcel. Deze laatste categorie is nog verder onderverdeeld naar methode om de brandstofcel van de benodigde brandstof te voorzien. Hierbij kunnen grofweg twee opties worden onderscheiden:

- *Voertuiggebonden waterstofproductie:*  
Waterstof wordt aan boord van de auto geproduceerd met behulp van een fuel processor. Voordeel hiervan is dat de infrastructuur voor productie, transport en distributie niet hoeft te worden gewijzigd. Voornaamste nadeel is dat de brandstofcel in dit geval niet wordt gevoed met zuiver waterstof maar met een mengsel van voornamelijk H<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub>. Hierdoor kan niet het maximale rendement van de brandstofcel worden bereikt. Tevens betekent dit dat de brandstofcelauto niet vrij is van schadelijke emissies (dus niet alleen waterdamp uit de uitlaat). In ieder geval is er sprake van CO<sub>2</sub>-emissie. Daarnaast wordt de technologie onder de ‘motorkap’ complexer dan wanneer geen fuel processor aan boord is. Voorlopig vormt de productie van waterstof uit de huidige logistieke brandstoffen met behulp van een fuel processor aan boord van een auto vanuit technisch oogpunt nog een lastig probleem.
- *Centrale of decentrale waterstofproductie:*  
Waterstof wordt grootschalig centraal of kleinschaliger decentraal op het tankstation geproduceerd. Bij deze optie wordt het voertuig afgetankt met waterstof welke direct toegepast kan worden. Nadelen van deze opties zijn dat de brandstofinfrastructuur vergaand moet worden aangepast en dat de opslag in de auto nog problematisch is. Voordeel is dat aan boord van de auto hogere rendementen mogelijk zijn en daarnaast de technologie onder de ‘motorkap’ minder complex is. Tevens is het met deze optie mogelijk om grootschalig CO<sub>2</sub> af te vangen en op te slaan. Op langere termijn kan waterstof worden geproduceerd uit hernieuwbare bronnen. Voorlopig is het op basis van economische overwegingen aannemelijker dat waterstof uit fossiele bron (lees: aardgas) wordt geproduceerd.

Voor ieder van bovenstaande opties (dus interne verbrandingsmotor of brandstofcelaandrijving) is gekozen om, zoals vermeld in § 4.3.2.3, drie voertuigtypen te beschouwen, te weten:

1. Personenauto's;
2. Bestelauto's;
3. Lichte vrachtwagens en bussen.

Lichte vrachtauto's worden gedefinieerd als auto's voor vrachtvervoer met een laadvermogen kleiner dan 3500 kg.

Omdat de geraadpleegde literatuur niet genoeg gegevens bevat over well-to-wheels emissies van personenauto's met interne verbrandingsmotor en diesel als brandstof, moet binnen deze studie de beperking worden opgelegd dat alle personenauto's met interne verbrandingsmotor benzine als brandstof gebruiken. Voor vrachtauto's en bussen met een interne verbrandingsmotor geldt deze beperking niet omdat deze typen voertuigen hoofdzakelijk allemaal diesel als brandstof gebruiken. Wanneer een brandstofcel wordt toegepast is uitgegaan van voertuiggebonden waterstofproductie en centrale of decentrale waterstofproductie. In de eerste situatie wordt dezelfde brandstof getankt als wanneer een interne verbrandingsmotor wordt toegepast, dus benzine of diesel, waarbij deze aan boord wordt omgezet in waterstof. In de tweede situatie wordt pure waterstof getankt welke direct geschikt is voor toepassing.

Bovenstaande leidt in totaal tot 9 categorieën waarvoor gegevens zijn verzameld. Deze categorieën zijn samengevat in Tabel 10. Van alle in de literatuur aangetroffen cases is beoordeeld of ze in één van deze categorieën ondergebracht kunnen worden, en zo ja in welke.

Tabel 10: *Geselecteerde categorieën voor well-to-wheels analyse*

Type voertuig	Krachtbron	Brandstof	Primaire bron	Categorie
Personenauto	Verbrandingsmotor (ICE)	Benzine	Aardolie	<i>Benzine/ICE</i>
	Brandstofcel (FC)	Benzine	Aardolie	<i>Benzine/FC</i>
	Brandstofcel (FC)	Waterstof	Aardgas	<i>H2/FC</i>
Lichte vrachtauto, Bestelauto	Verbrandingsmotor (ICE)	Diesel	Aardolie	<i>Diesel/ICE</i>
	Brandstofcel (FC)	Diesel	Aardolie	<i>Diesel/FC</i>
	Brandstofcel (FC)	Waterstof	Aardgas	<i>H2/FC</i>
Bus	Verbrandingsmotor (ICE)	Diesel	Aardolie	<i>Diesel/ICE</i>
	Brandstofcel (FC)	Diesel	Aardolie	<i>Diesel/FC</i>
	Brandstofcel (FC)	Waterstof	Aardgas	<i>H2/FC</i>

Bij verdere verwijzingen in dit rapport wordt verwezen naar één van de geselecteerde categorieën, zal de cursieve benaming worden weergegeven zoals vermeldt in Tabel 10 onder de kolom categorie.

## 4.5 Resultaten well-to-wheels in de literatuur

Het vergelijken van verschillende well-to-wheels studies is niet eenvoudig omdat de totale brandstofketens slechts zelden op dezelfde manier zijn opgebouwd. Als dit al het geval is dan blijft vergelijking van resultaten vaak lastig omdat de aannamen vaak verschillen als gevolg van specifieke lokale omstandigheden. Ook zijn er verschillende aannamen ten aanzien van technologieontwikkeling en/of zichtperiode van de studie. Ter illustratie: het maakt uiteraard verschil of voor de productie van methanol in 2020 wordt uitgegaan van de huidige productiefaciliteiten, van huidige state-of-the-art processen, van 'huidige' dan wel state-of-the-art processen anno 2020 of van een mix daarvan.

### 4.5.1 Aard en hoeveelheid data

Uit de geraadpleegde literatuur blijkt een groot verschil tussen de hoeveelheid en aard van de gepresenteerde data te zitten. Tabel 9 geeft een overzicht van de aangetroffen data. In deze tabel is aangegeven welke voertuigen beschouwd worden en of absolute dan wel relatieve emissies gegeven zijn. Ook is per referentie het aantal verschillende cases gegeven. Dit aantal varieert zeer sterk. Met name het GREET-model (Wang, 1999b) omvat een zeer groot aantal verschillende cases. De variëteit zit met name in de verscheidenheid aan secundaire brandstoffen en in verschillen in primaire bronnen. Twee bronnen zijn in elektronische vorm als computermodel beschikbaar, namelijk: GREET (Wang, 1999b) in de vorm van een Excel Spreadsheet en Advisor (NREL, 2002) in de vorm van MATLAB modellen.

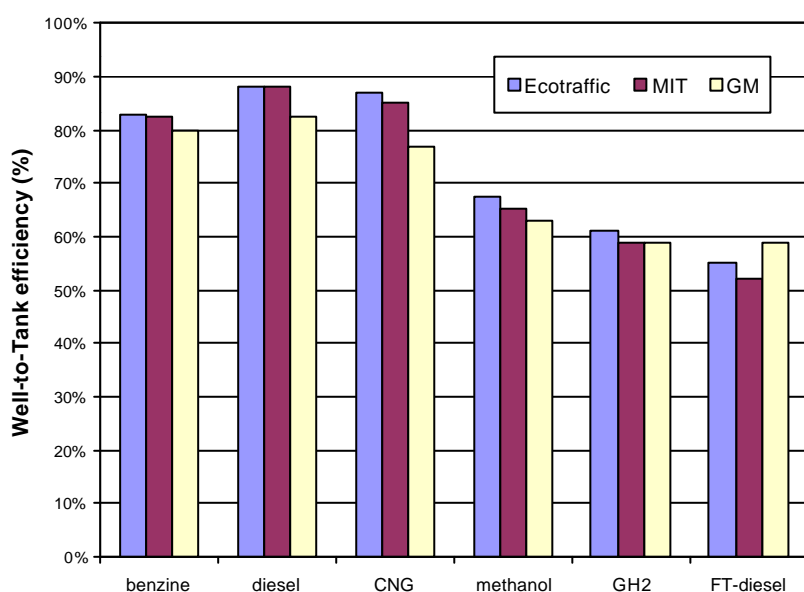
De uit de geraadpleegde literatuur afkomstige resultaten zullen, voor zowel well-to-wheels rendementen als well-to-wheels emissies, hieronder worden weergegeven.

#### 4.5.2 Well-to-wheels rendementen

De well-to-wheels rendementen worden op basis van 3 verschillende studies weergegeven, te weten: Ecotrafic (Ahlvik, 2001), MIT(Weiss, 2000), GM (Guzella, 1999). Hierbij wordt naast het well-to-wheels rendement tevens het well-to-tank en tank-to-wheels rendement weergegeven. Bij de weergave van deze rendementen is uitgegaan van Tabel 10, waarbij opgemerkt dient te worden dat de weergave alleen voor personenauto's heeft plaatsgevonden. Dit heeft geen consequenties voor het well-to-tank rendement, immers dit is voertuig onafhankelijk, maar wel voor het tank-to-wheels en dus well-to-wheels rendement.

##### 4.5.2.1 Rendementen well-to-tank ketens

De (absolute) well-to-tank rendementen voor de belangrijkste typen secundaire brandstoffen staan weergegeven in Figuur 4. Wat opvalt is dat secundaire brandstoffen uit aardolie (conventionele brandstoffen; benzine en diesel) een hoger well-to-tank rendement hebben dan secundaire brandstoffen uit aardgas (alternatieve brandstoffen; methanol, Gasvormige H<sub>2</sub>, FT-diesel). Vermeld moet worden dat het well-to-tank rendement van CNG aanzienlijk hoger scoort dan het well-to-tank rendement van de alternatieve secundaire brandstoffen en zelfs kan concurreren met het well-to-tank rendement van de conventionele secundaire brandstoffen. Dit komt omdat bij het productieproces van CNG geen conversie (alleen compressie) van primaire brandstof (aardgas) plaats, daar waar dit bij de andere brandstoffen wel het geval is.



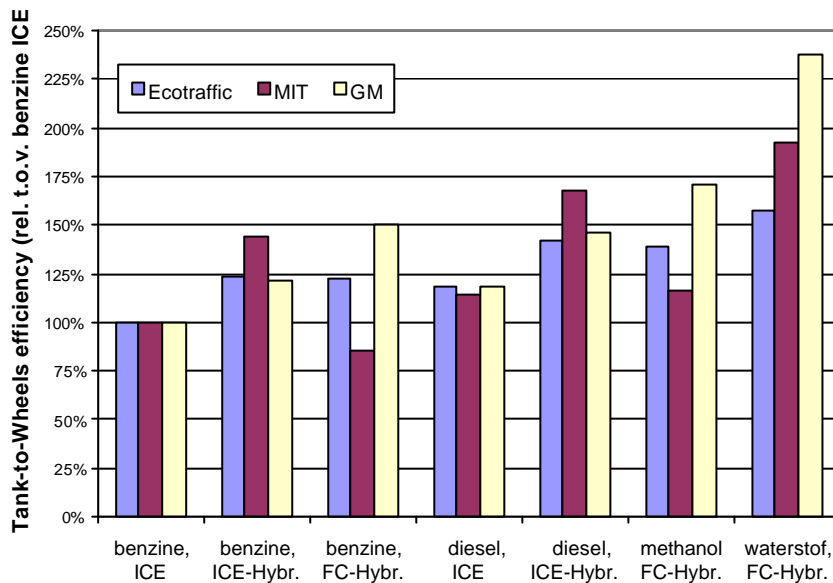
Figuur 4: Absolute well-to-tank rendementen voor conventionele benzine en diesel en enkele alternatieve brandstoffen geproduceerd uit aardgas. Ecotrafic (Ahlvik, 2001), MIT (Weiss, 2000), GM (Guzella, 1999).

Ook valt op dat de spreiding in de well-to-tank rendementen tussen de drie geraadpleegde studies onderling (Ecotrafic, MIT, GM) beperkt is.

#### 4.5.2.2 Rendementen tank-to-wheels ketens

Het relatieve tank-to-wheels rendement voor verschillende typen personenauto krachtbronnen (ICE-hybride en FC-hybride) ten opzichte van een geavanceerde conventionele interne verbrandingsmotor, welke bedreven wordt op benzine (benzine, ICE = 100%), staat weergegeven in Figuur 5. Wat opvalt is dat alle alternatieve aandrijfbronnen een hoger tank-to-wheels rendement hebben dan de referentie (benzine, ICE), met uitzondering van de FC-hybride op benzine binnen de MIT studie. Het is moeilijk om uit de grote hoeveelheid data precies te verklaren waarom deze aanzienlijke afwijking ten opzichte van de andere twee studies (Ecotrafic, GM) optreedt.

Ook valt op dat, in tegenstelling tot de well-to-tank rendementen, de onderlinge spreiding tussen de tank-to-wheels rendementen van de drie geraadpleegde studies aanzienlijk is. Met name binnen de groepen FC-hybride op benzine als op waterstof is een grote spreiding te zien.



Figuur 5: Relatieve tank-to-wheels rendementen voor ICE, ICE-hybride en FuelCell-hybride personenauto's met benzine, diesel (conventioneel) en methanol, gasvormige waterstof (alternatief) als brandstof. Ecotrafic (Ahlvik, 2001), MIT(Weiss, 2000), GM (Guzella, 1999).

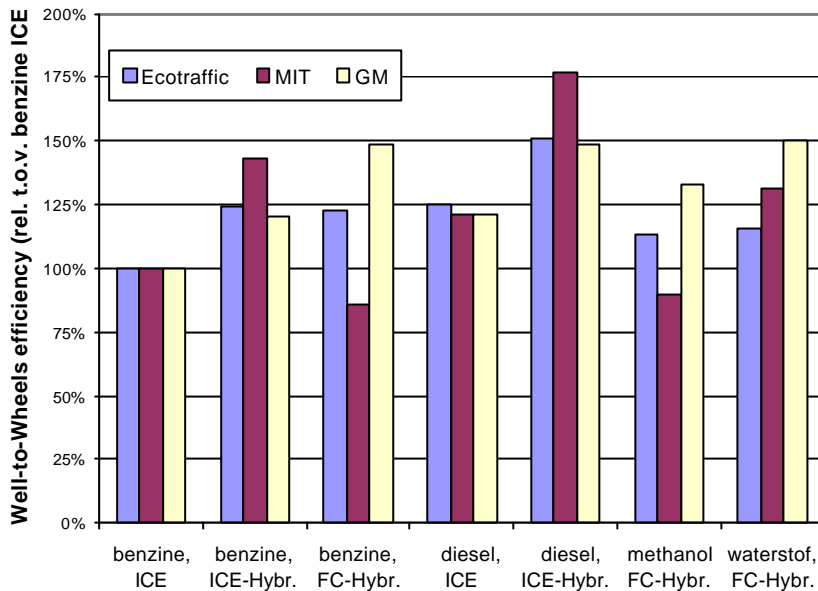
Van alle tank-to-wheels rendementen steekt de FC-hybride op waterstof met kop en schouders boven de rest uit. Ten opzichte van de geavanceerde conventionele interne verbrandingsmotor welke bedreven wordt op benzine, is meer dan een verdubbeling van het rendement mogelijk. Echter, dit zegt nog niets over het rendement van de totale keten (well-to-wheels). Hier wordt in de volgende paragraaf dieper op ingegaan.

#### 4.5.2.3 Rendementen well-to-wheels ketens

Well-to-wheels rendementen zijn samengesteld uit het product van het well-to-tank en tank-to-wheels rendement en staan weergegeven in Figuur 6. Ook hier betreft het weer een relatieve weergave ten opzichte van een geavanceerde conventionele interne verbrandingsmotor welke bedreven wordt op benzine (benzine, ICE = 100%).

De grote spreiding die werd geconstateerd in het tank-to-wheels gedeelte is terug te vinden in de totale well-to-wheels keten. Wat ook opvalt is dat nagenoeg alle well-to-wheels rendementen beter scoren dan het totaalrendement van het referentievoertuig. Alleen de FC-hybride, op zowel benzine als methanol, binnen de MIT studie scoort enigszins lager. Wordt hiervoor echter naar het gemiddelde van de drie studies gekeken, dan is er nog steeds sprake van een toename in het well-to-wheels rendement.

Ook is zichtbaar dat, waar bij het tank-to-wheels rendement de FC-hybride op waterstof met kop en schouders boven de rest uit stak, het well-to-wheels rendement voor de FC-hybride op waterstof nu aanzienlijk lager ligt. Dit komt met name door het, ten opzichte van benzineproductie, lagere well-to-tank rendement waarmee gasvormige waterstof wordt geproduceerd.



Figuur 6: Well-to-wheels rendementen voor ICE, ICE-hybride en FuelCell-hybride personenauto's met benzine, diesel (conventioneel) en methanol, gasvormige waterstof (alternatief) als brandstof. Ecotrafic (Ahlvik, 2001), MIT (Weiss, 2000), GM (Guzella, 1999).

Opvallende winnaar, met een rendementsstijging van 50 tot 75% ten opzichte van het referentievoertuig, is de diesel hybride met interne verbrandingsmotor. Grote invloed op dit resultaat heeft enerzijds het hoge well-to-tank rendement (circa 85%) en anderzijds het hogere rendement van een Dieselmotor ten opzichte van een Ottomotor en het positieve effect van elektriciteitsopslag voor voertuigaandrijving. Dit effect is, zij het in mindere mate, ook zichtbaar bij de benzine hybride met interne verbrandingsmotor.

#### 4.5.3 Emissies well-to-wheels ketens

In deze studie zijn de uitkomsten van well-to-wheels emissies binnen de geraadpleegde literatuur met elkaar vergeleken. Gebleken is dat veel studies zich beperken tot CO<sub>2</sub>-emissies. Hiernaast geven enkele studies ook een weergave van enkele andere emissies. Om echter een zo goed mogelijk totaalbeeld te geven wordt binnen deze studie, naast het broeikasgas CO<sub>2</sub>, tevens de uitstoot van een verzurende (NO<sub>x</sub>) en een fijn stof (PM10) emissie weergegeven.

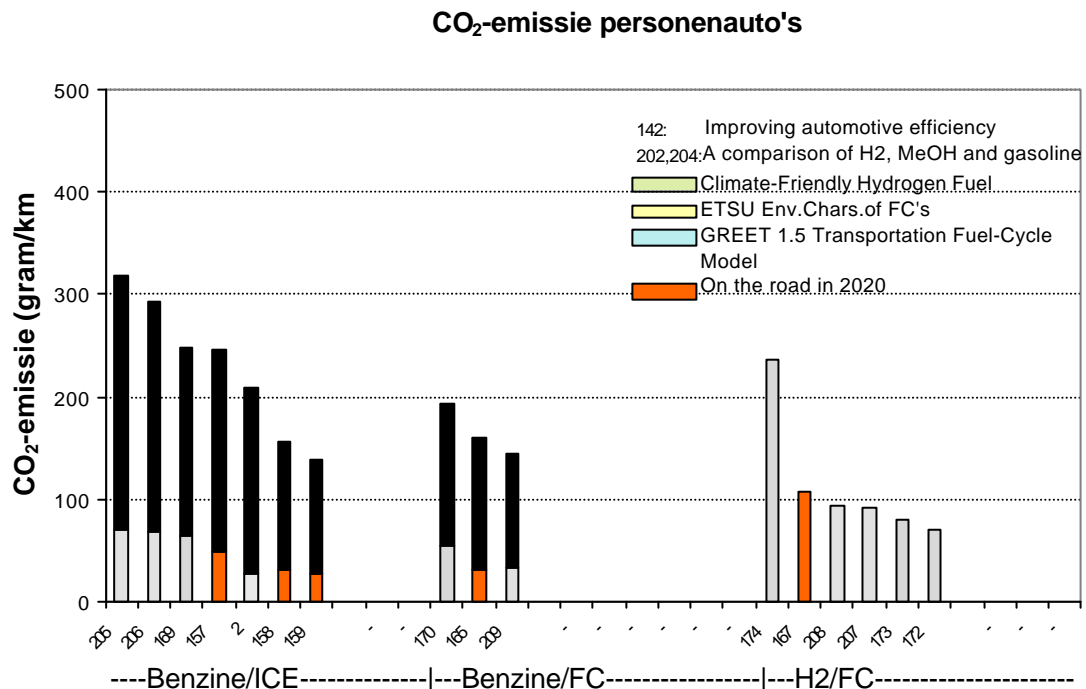
De well-to-wheels emissies van de drie, in Tabel 10 vermelde, voertuigtypen worden weergegeven in staafgrafieken. De waarden van de emissies zijn uitgesplitst naar een well-to-tank deel (onderste deel staaf) en een tank-to-wheels deel (bovenste deel staaf). De totale staaf vertegenwoordigt de well-to-wheels emissie. Het gearceerde deel van de staaf verwijst naar de gebruikte referentie welke is weergegeven als legenda in de staafgrafieken. De getallen op de horizontale as vertegenwoordigen de specifieke, uit de literatuur afkomstige, cases welke zijn weergegeven in de kolom "nummer" van *bijlage C*.

#### 4.5.3.1 CO<sub>2</sub>-emissies personenauto's

De well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissies van personenauto's voor de drie, in Tabel 10 onder de kolom "categorie" vermelde categorieën zijn weergegeven in Figuur 7. Wat opvalt is dat de referentiecategorie Benzine/ICE grote onderlinge verschillen in CO<sub>2</sub>-emissie heeft. Oorzaak hiervoor zit hoofdzakelijk in de tank-to-wheels keten en is driedelig, te weten:

- Verschil in voertuigmodel. Voorbeelden van verschillende voertuigmodellen zijn 'mid size' passenger car, Mercedes A-klasse en Toyota Camry. Deze verschillen uiten zich in verschillen in gewicht, luchtweerstand, rolweerstand, etc.
- Verschil in ontwikkelingsstadium van het voertuig, toepassing van nieuwe technieken voor gewichtsvermindering en weerstandsvermindering, etc.
- Verschil in uitvoering en ontwikkelingsstadium van de transmissie.

Echter, ook het well-to-tank deel mag niet uitgevlakt worden. De onderlinge verschillen zijn hier absoluut wel minder, maar relatief doen ze niet veel onder voor het tank-to-wheels deel. Ook hier komen de verschillen hoofdzakelijk voort uit verschil in tijdspad, en dus ontwikkelingsstadium (zie bijlage C). Hiernaast leidt ook het verschil in herkomst van de literatuurstudies tot verschillen. Met name het ETSU rapport (referentiejaar 2000) geeft ten opzichte van de overige literatuurstudies, waarvan de meeste een later referentiejaar hebben, een lage well-to-tank CO<sub>2</sub>-emissie.



Figuur 7: Vergelijking well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissies van personenauto's, met uitsplitsing naar well-to-tank (zwart) en tank-to-wheels. Kleur en arcering verwijzen naar literatuurreferentie, getallen op de horizontale-as naar case-nummers in bijlage C.

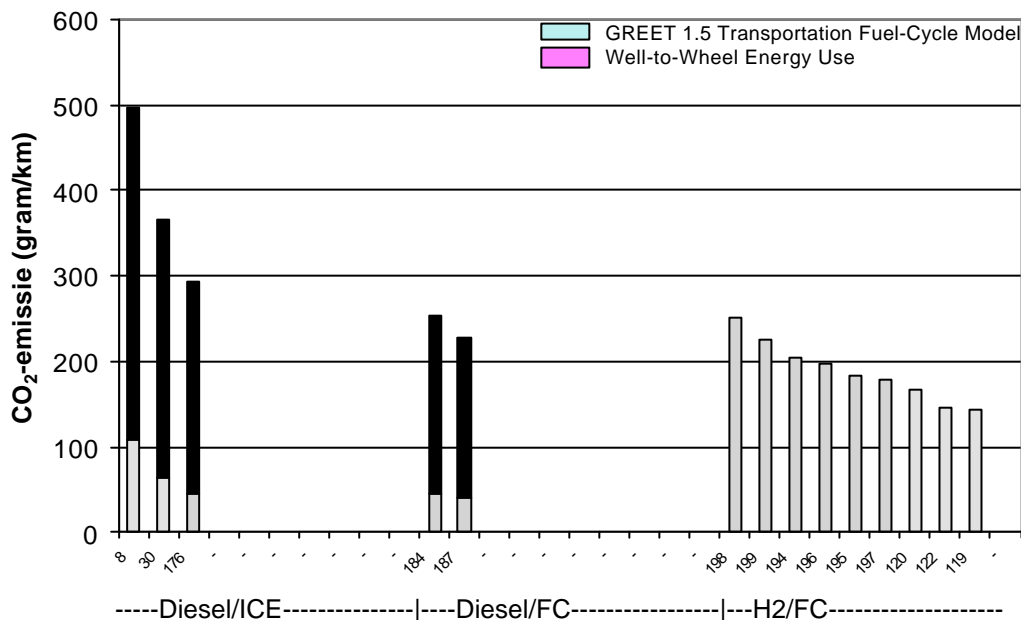
De categorie Benzine/FC vertoont ook een aanzienlijke onderlinge spreiding. Deels kan dit weer verklaard worden door de verschillen in voertuigmodel en ontwikkelingsstadium (zie hierboven). Daarnaast leidt het wel of niet toepassen van elektriciteitsopslag, om zo een hybride aandrijving te vormen, ook tot verschillen. Het algemene beeld is dat de totale CO<sub>2</sub>-emissie lager is dan de Benzine/ICE categorie. Dit is conform het geschetste beeld binnen § 4.5.2.2, waar het tank-to-wheels rendement van de Benzine/FC categorie aanzienlijk hoger bleek te zijn dan die van de Benzine/ICE categorie. Dit hogere rendement resulteert in een lager brandstofverbruik per kilometer en dus een lagere CO<sub>2</sub>-emissie.

De categorie H2/FC heeft, omdat er zuivere waterstof als (secundaire) brandstof wordt gebruikt, altijd een tank-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissie van nul. De resultaten voor deze categorie vertonen een klein onderling verschil, met uitzondering van één grote uitschieter (ref. 174). In deze case wordt waterstof geproduceerd middels elektrolyse waarbij de benodigde elektriciteit afkomstig is uit fossiele bron, terwijl bij alle andere cases waterstof middels reforming processen en dus op veel efficiëntere wijze uit aardgas wordt geproduceerd. Het algemene beeld is dat de H2/FC categorie een lagere well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissie heeft dan zowel de Benzine/ICE als de Benzine/FC categorie.

#### 4.5.3.2 CO<sub>2</sub>-emissies bestelauto's en lichte vrachtwagens

De well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissies van bestelauto's en lichte vrachtwagens voor de drie, in Tabel 10 onder de kolom "categorie" vermelde, categorieën zijn weergegeven in Figuur 8. Wat opvalt is dat de referentiecategorie Diesel/ICE grote onderlinge verschillen in CO<sub>2</sub>-emissie heeft. De oorzaak hiervoor zit wederom hoofdzakelijk in de tank-to-wheels keten (te weten: voertuigmodel en technologisch ontwikkelingsstadium) en staat beschreven in de vorige paragraaf.

**CO<sub>2</sub>-emissie bestelauto's en lichte vrachtwagens (<3,5ton)**



Figuur 8: *Vergelijking well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissies van bestelauto's en lichte vrachtwagens, met uitsplitsing naar well-to-tank (zwart) en tank-to-wheels. Kleur en arcering verwijzen naar literatuurreferentie, getallen op de horizontale-as naar case-nummers in bijlage C.*

De categorie Diesel/FC heeft slechts twee literatuurreferenties, welke in waarde slechts een klein onderling verschil hebben. Het algemene beeld is dat de totale CO<sub>2</sub>-emissie lager is dan de Diesel/ICE categorie. Dit is conform het geschetste beeld binnen § 4.5.2.2, waar het tank-to-wheels rendement van de FC aangedreven voertuigen aanzienlijk hoger bleek te zijn dan van voertuigen met een conventionele interne verbrandingsmotor. Dit hogere rendement resulteert in een lager brandstofverbruik per kilometer en dus een lagere CO<sub>2</sub>-emissie.

De categorie H2/FC heeft een groot aantal punten, welke afkomstig zijn uit twee literatuurstudies. Omdat zuivere waterstof als (secundaire) brandstof wordt gebruikt, heeft deze categorie altijd een tank-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissie van nul. De resultaten voor de H2/FC categorie vertonen een geringe onderlinge spreiding. Deze wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de manier waarop en in welke vorm (gasvormig of vloeibaar) waterstof wordt geproduceerd en of

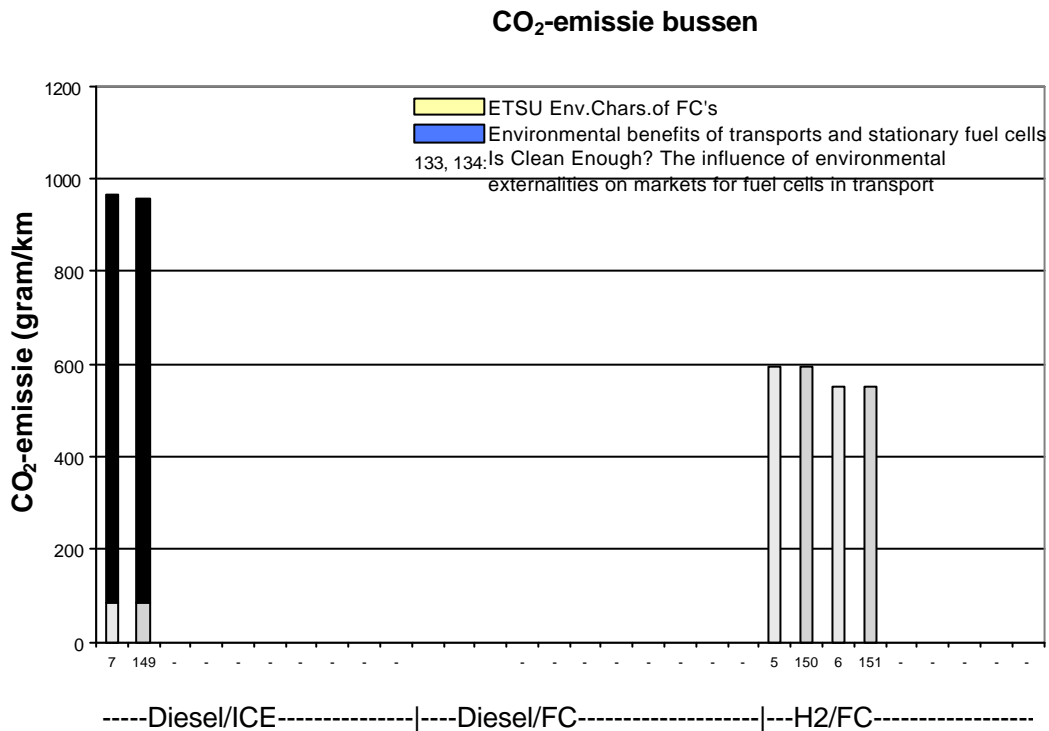


bij de aandrijving gebruik wordt gemaakt van elektriciteitsopslag. Hiernaast speelt ook het referentiejaar van de technologie binnen de desbetreffende literatuurstudie weer een belangrijke rol (zie bijlage C).

Het algemene beeld is dat beide brandstofcelopties een lagere CO<sub>2</sub>-emissie hebben dan de referentie ICE aandrijving, waarbij de laagste CO<sub>2</sub>-emissies worden gerealiseerd door waterstof centraal of decentraal te produceren en het voertuig van zuivere, vloeibare of gasvormige, waterstof te voorzien.

#### 4.5.3.3 CO<sub>2</sub>-emissies bussen

De well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissies van bussen voor de drie in Tabel 10 vermelde categorieën zijn weergegeven in Figuur 9. Wat opvalt is dat de referentiecategorie Diesel/ICE, in tegenstelling tot de overige referentiecategorieën nauwelijks onderlinge verschillen in CO<sub>2</sub>-emissie heeft. Enerzijds komt dit (uiteraard) door het geringe aantal referenties en anderzijds omdat beide referenties, al hoewel betrekking hebbend op verschillende studies, afkomstig zijn van dezelfde auteur (zie bijlage C).



Figuur 9: Vergelijking well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissies van bussen, met uitsplitsing naar well-to-tank (zwart) en tank-to-wheels. Kleur en arcering verwijzen naar literatuurreferentie, getallen op de horizontale-as naar case-nummers in bijlage C.

Voor de categorie Diesel/FC zijn binnen de geraadpleegde literatuur geen punten gevonden.

De categorie H2/FC heeft een groter aantal punten, welke afkomstig zijn uit twee verschillende literatuurstudies. De H2/FC categorie heeft, omdat er zuivere waterstof als (secundaire) brandstof wordt gebruikt, altijd een tank-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissie van nul. De resultaten voor deze categorie vertonen een zeer kleine onderlinge spreiding. Deze zullen hoofdzakelijk worden veroorzaakt door het verschil in type brandstofcel, te weten SPFC versus PAFC (zie bijlage C).

Ook hier is het algemene beeld dat de brandstofceloptie een lagere CO<sub>2</sub>-emissie heeft dan de referentie Diesel/ICE aandrijving, waarbij de laagste CO<sub>2</sub>-emissies worden gerealiseerd door centrale waterstofproductie uit aardgas en toepassing van de PAFC.

#### 4.5.4 Compensatie uitgangspunten referentie

Kijkend naar de totale well-to-wheels ketens kan worden geconcludeerd dat de uit de literatuurstudie afkomstige resultaten voor de well-to-tank ketens kleine onderlinge spreiding vertonen. De grote verschillen treden met name op in het tank-to-wheels deel van de totale keten, met andere woorden; het voertuigspecifieke gedeelte. Deze verschillen worden hoofdzakelijk gevormd door verschil in voertuigmodel, verschil in ontwikkelingsstadium van zowel aandrijfbron als transmissie.

De hierboven genoemde verschillen treden echter niet alleen op bij nog te introduceren hybride- en brandstofcelvoertuigen, maar ook bij de als referentie gehanteerde conventionele voertuigen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de referentie niet eenduidig is. Om de invloed van de verschillende uitgangspunten binnen de geraadpleegde literatuurstudies zoveel mogelijk te verkleinen, zijn in Tabel 11 de emissies (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM10) binnen de desbetreffende studies gegeven. Hierbij wordt de relatieve emissie van de brandstofcelvoertuigen voor de drie verschillende, in Tabel 10 vermelde, type voertuigen weergegeven ten opzichte van het referentievoertuig *in dezelfde publicatie*. Indien meerdere referentievoertuigen in een publicatie voorkwamen is de gemiddelde emissie van deze referentievoertuigen gebruikt. De verschillen tussen de diverse literatuurstudies door verschillen in referentiesituatie, worden hierdoor grotendeels gecompenseerd.

#### 4.5.5 Gemiddelde relatieve emissies: CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en PM10

Tabel 11 is ingedeeld in drie horizontale secties elk beginnend met 'Referentie'. De eerste sectie behandelt de CO<sub>2</sub> emissie. In de 1<sup>ste</sup> en 2<sup>de</sup> kolom wordt de literatuurreferentie gegeven, die de bron is van deze gegevens. In de 3<sup>de</sup>, 4<sup>de</sup> en 5<sup>de</sup> kolom staan achtereenvolgens:

- De absolute waarden van de CO<sub>2</sub> emissie in gram per km. Eén rij voor elke door een conventionele interne verbrandingsmotor (ICE) aangedreven voertuig op benzine;
- De relatieve emissie (t.o.v. kolom 3) door een brandstofcel (FC) aangedreven personenauto met een 'on board' reformer voor benzine;
- De relatieve emissie (t.o.v. kolom 3) door een brandstofcel (FC) aangedreven personenauto waarbij de auto zuivere waterstof tankt.

Als in één artikel meerdere cases besproken werden die in de 4<sup>de</sup> kolom of 5<sup>de</sup> kolom vielen dan werden deze waarden gemiddeld. De 6<sup>de</sup>, 7<sup>de</sup>, 8<sup>ste</sup> en 9<sup>de</sup>, 10<sup>de</sup>, 11<sup>de</sup> kolom bevatten dezelfde gegevens voor respectievelijk lichte vrachtwagens (LDT) en bussen, waarbij benzine uiteraard vervangen is door diesel.

Naast de emissie van CO<sub>2</sub> is in Tabel 11 ook de uitstoot van NO<sub>x</sub> en PM10 gegeven. Deze zijn weergegeven in sectie 2 en 3 van de tabel. De hoeveelheid data met betrekking tot NO<sub>x</sub> en PM10 is kleiner dan die van CO<sub>2</sub>. Slechts in één geval zijn er twee datapunten binnen een categorie. In alle gevallen is de emissiereductie van zowel NO<sub>x</sub> als PM10 aanzienlijk.

De gemiddelde relatieve emissies en het relatieve primaire energiegebruik ten opzichte van de referentietechnologie uit Tabel 11, zijn samengevat in Tabel 12. Het betreft hier de gemiddelde waarden ten opzichte van de referentiecategorie binnen één publicatie. Indien meerdere referentiecases binnen één publicatie aanwezig waren is het gemiddelde van de cases genomen. Zowel de emissie als het primaire energieverbruik van de referentietechnologie, welke relatief beiden 100% bedragen, zijn in deze tabel niet weergegeven. Voor bussen aangedreven door een brandstofcel met als brandstof diesel (Diesel/FC) zijn binnen de geraadpleegde literatuur geen waarden gevonden.

Tabel 11: Gemiddelde well-to-wheels emissies van overeenkomstige categorieën binnen dezelfde referentie.

		Personenauto's			Lichte vrachtwagens (LDT)			Bussen		
		CO2 (g/km)		Relatieve emissie	CO2 (g/km)		Relatieve emissie	CO2 (g/km)		Relatieve emissie
		Benzine/ICE	Benzine/FC	H2/FC	Diesel/ICE	Diesel/FC	H2/FC	Diesel/ICE	Diesel/FC	H2/FC
<b>Referentie</b>										
Initial assessment of the Env.Chars.of FC's (ETSU)	D.Hart	319	-	-	-	-	-	966	-	0.62
REET 1.5 Transportation Fuel-Cycle Model	M.Q.Wang	294	0.49	0.32	496	-	0.31	-	-	-
REET 1.5 Transportation Fuel-Cycle Model	M.Q.Wang	248	0.59	0.37	366	-	0.41	-	-	-
Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Jamin. Y.	245	0.79	0.56	-	-	-	-	-	-
On the road in 2020	Weiss. M.A.	210	0.77	0.51	-	-	-	-	-	-
On the road in 2020	Weiss. M.A.	157	1.02	0.68	-	-	-	-	-	-
On the road in 2020	Weiss. M.A.	138	1.16	0.77	-	-	-	-	-	-
Well-to-Wheel Energy Use	Wallace. J.P.	-	-	-	293	0.82	0.71	-	-	-
Environmental benefits of transports and stationary fuel cells	D.hart	210	-	0.40	-	-	-	956	-	0.58
Is Clean Enough? The Influence of Environmental Externalities on Markets for Fuel cells in Transport	G.Hormandinger	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Referentie</b>										
Initial assessment of the Env.Chars.of FC's (ETSU)	D.Hart	0.15	-	-	-	-	-	5.80	-	0.07
REET 1.5 Transportation Fuel-Cycle Model	M.Q.Wang	0.473	0.20	0.26	1.482	0.16	0.13	-	-	-
Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Jamin. Y.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
On the road in 2020	Weiss. M.A.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Well-to-Wheel Energy Use	Wallace. J.P.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Environmental benefits of transports and stationary fuel cells	D.hart	0.260	-	0.09	-	-	-	5.80	-	0.07
Is Clean Enough? The Influence of Environmental Externalities on Markets for Fuel cells in Transport	G.Hormandinger	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Referentie</b>										
Initial assessment of the Env.Chars.of FC's (ETSU)	D.Hart	0.0	-	-	-	-	-	0.11	-	0.15
REET 1.5 Transportation Fuel-Cycle Model	M.Q.Wang	0.052	0.56	0.48	0.065	0.52	0.42	-	-	-
Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Jamin. Y.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
On the road in 2020	Weiss. M.A.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Well-to-Wheel Energy Use	Wallace. J.P.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Environmental benefits of transports and stationary fuel cells	D.hart	0.010	-	0.00	-	-	-	0.11	-	0.15
Is Clean Enough? The Influence of Environmental Externalities on Markets for Fuel cells in Transport	G.Hormandinger	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 12 toont aan dat brandstofcelvoertuigen over de totale well-to-wheels keten een lagere CO<sub>2</sub> emissie hebben dan voertuigen welke worden aangedreven door een interne verbrandingsmotor. Ook valt af te leiden dat centrale dan wel decentrale waterstofproductie (H<sub>2</sub>/FC) tot lagere emissies en verminderd primair energiegebruik leidt, dan voertuiggebonden waterstofproductie (on-board reforming: Benzine/FC en Diesel/FC).

Tabel 12: *Gemiddelde relatieve well-to-wheels emissies t.o.v. referentietechnologie.*

Relatieve waarden	Personenauto's		Lichte vrachtwagens		Bussen	
	Benzine/FC	H <sub>2</sub> /FC	Diesel/FC	H <sub>2</sub> /FC	Diesel/FC	H <sub>2</sub> /FC
CO <sub>2</sub> emissie	0,80	0,52	0,82	0,48	-	0,60
NO <sub>x</sub> emissie	0,20	0,20	0,16	0,13	-	0,07
PM10 emissie	0,56	0,48	0,52	0,42	-	0,15
Primair E-gebruik*	0,80	0,67	0,82	0,63	-	0,78

\* Het relatieve primaire energiegebruik wordt berekend op basis van relatieve CO<sub>2</sub> emissie en de verhouding van emissiefactoren aardgas/diesel c.q. aardgas/benzine. Aardgas: 56,2 kgCO<sub>2</sub>/GJ<sub>LHV</sub>, Benzine/Diesel: 73,2 kgCO<sub>2</sub>/GJ<sub>LHV</sub>.

Op basis van de relatieve CO<sub>2</sub>-emissie en de emissiefactoren van aardgas, benzine en diesel is het relatieve primaire energiegebruik berekend. Impliciet is hierbij aangenomen dat alle hulpvermogen over de gehele keten door de primaire brandstof wordt geleverd: dus olie bij benzine/diesel en aardgas bij waterstof. De H<sub>2</sub>/FC categorieën hebben een lager primair energiegebruik dan de referentiecasse en de Benzine/FC en Diesel/FC categorieën. Het verschil in primair energiegebruik tussen Benzine/FC en H<sub>2</sub>/FC is echter niet zo groot als bij de relatieve CO<sub>2</sub> emissie. De oorzaak hiervan is dat aardgas, waaruit de waterstof in alle gevallen gemaakt wordt, ten opzichte van benzine en diesel een relatief lage CO<sub>2</sub>-emissie heeft per eenheid primaire energie. Met andere woorden, conventionele benzine en diesel bevatten meer koolstof.

De NO<sub>x</sub> emissie van brandstofcelvoertuigen, hetzij met of zonder on-board reforming, is aanzienlijk lager dan van voertuigen met een interne verbrandingsmotor. Ook de uitstoot van PM10 kan aanzienlijk teruggebracht worden met brandstofcelvoertuigen. Voor zowel NO<sub>x</sub> als PM10 is er een meerwaarde van het tanken van waterstof ten opzichte van on-board reforming. Dit komt omdat brandstofcelvoertuigen die centraal van waterstof worden voorzien, alleen in het well-to-tank traject NO<sub>x</sub> en PM10 (afkomstig uit brandstof) emitteren. Grootschalige centrale waterstofproductie kan met een hoger rendement plaats vinden dan kleinschalige on-board reforming, waardoor er minder schadelijke stoffen geëmitteerd worden. Echter, de meerwaarde van het tanken van waterstof ten opzichte van on-board reforming is relatief klein in verhouding tot de meerwaarde van brandstofcelvoertuigen met on-board reforming ten opzichte van de referentie.

## 5. KWANTIFICERING MILIEUPOTENTIEEL

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal, op basis van de resultaten van de voorgaande hoofdstukken, een afschatting worden gemaakt van de milieuwinst welke in Nederland verwacht mag worden bij de vervanging van conventionele voertuigen door brandstofcelvoertuigen. Eerst zullen de uitgangspunten worden vastgesteld. De kwantificering heeft tot doel het belang van brandstofcelvervoer in te schatten. Een meer nauwkeurige inschatting van het emissiereductiepotentieel, inclusief inschatting van de onzekerheden hierin, is in een ander kader voorzien.

### 5.2 Uitgangspunten

De inschatting van het emissiereductiepotentieel zal gedaan worden op basis van de huidige vervoersprestaties (gereden kilometers). Er wordt dus geen projectie gegeven van de groei van het vervoer, noch van autonome ontwikkelingen van de specifieke emissies van voertuigen. Er zal worden uitgegaan van een volledige vervanging van de huidige voertuigen met interne verbrandingsmotor door brandstofcelvoertuigen.

Voor de emissies van brandstofcelvoertuigen worden de waarden uit Tabel 12 genomen. Dit zijn de relatieve emissies ten opzichte van de referentietechnologie binnen een publicatie. De referentie-emissies (ICE) zijn die van zowel voertuigen op basis van huidige technologie, als een verdere ontwikkeling daarvan.

Samenvattend wordt het emissiereductiepotentieel als volgt gedefinieerd:

$$\text{Emissiereductiepotentieel} = \text{huidige emissie} * \left( 1 - \left[ \frac{\text{gemiddelde WTW emissie brandstofcelvoertuig}}{\text{gemiddelde WTW emissie referentievoertuig}} \right] \right)$$

Door deze aannamen worden drie belangrijke effecten niet meegenomen:

- Een *overschatting* van het emissiereductiepotentieel door de relatieve emissie van brandstofcelvoertuigen te baseren op een mix van huidige en toekomstige referentievoertuigen. Toekomstige referentievoertuigen zullen een lagere specifieke emissie hebben. De referentie in Tabel 13 is een mix van huidige en toekomstige voertuigen;
- Een *overschatting* van het emissiereductiepotentieel door vervanging van huidige auto's met een zeer hoge emissie niet mee te nemen. Momenteel rijden er nog veel auto's die een hogere emissie hebben dan de referentievoertuigen. Deze zullen in de komende jaren worden vervangen door auto's met een lagere specifieke emissie, vergelijkbaar met de referentiecategorie. Dit autonome effect is met name bij NO<sub>x</sub> emissies van belang;
- Een *onderschatting* van het emissiereductiepotentieel door groei van vervoersprestatie niet mee te nemen.

### 5.3 Berekening CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel

De berekening van het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel van brandstofcelvoertuigen is gegeven in Tabel 13. Alle aannamen van paragraaf 5.2 zijn van kracht. De oorspronkelijke well-to-wheels emissie in Tabel 13 is enerzijds gebaseerd op Tabel 8 (tank-to-wheels) en anderzijds op Figuur 7 en Tabel 11 (well-to-tank). Op basis van Figuur 7 en Tabel 9 is de gemiddelde verhouding

tussen de CO<sub>2</sub>-emissie van het well-to-tank en het tank-to-wheels deel bepaald, voor de referentievoertuigen personenauto Benzine/ICE, lichte vrachtwagens Diesel/ICE en bussen Diesel/ICE. Deze verhouding wordt in Tabel 13 gebruikt om de oorspronkelijke well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissie te berekenen.

Gestart wordt met de relatieve CO<sub>2</sub>-emissie ten opzichte van de referentie, welke is verkregen uit Tabel 12. Van de beschikbare data is de gemiddelde waarde van de relatieve emissies genomen. Bij de oorspronkelijke emissies van lichte vrachtwagens is de emissie van bestelauto's geïntegreerd. Bij de oorspronkelijke emissies van bussen is uitgegaan van die van lijn- en niet lijnvervoer. Combinatie van deze twee gegevens levert de emissie bij volledige vervanging van het huidige Nederlandse voertuigpark door brandstofcelvoertuigen en de emissiereductie die daarmee gepaard gaat.

Uit de resultaten in Tabel 13 blijkt dat de maximale potentiële emissiereductie van de personenautosector met 10800 kton CO<sub>2</sub>/jr het grootst is, gevolgd door die van lichte vrachtwagens (en bestelauto's) met 2626 kton CO<sub>2</sub>/jr. Bussen bereiken een maximale emissiereductie van 224 kton CO<sub>2</sub>/jr.

Tabel 13: Berekening well-to-wheels CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel in Nederland

	Personenauto		Lichte vrachtwagen <sup>(1)</sup>		Bussen <sup>(2)</sup>	
	Benz./FC	H2/FC	Diesel/FC	H2/FC	Diesel/FC	H2/FC
Relatieve emissie t.o.v. referentie [%]	80%	52%	82%	48%	n.b.	60%
Oorspronkelijke WTW emissie [kton CO <sub>2</sub> eq/jr]	22500	22500	5050	5050	560	560
Emissie bij volledige vervanging[kton CO <sub>2</sub> eq/jr]	18000	11700	4141	2424	n.b.	336
Emissie <i>reductie</i> bij volledige vervanging [kton CO <sub>2</sub> eq/jr]	4500	10800	909	2626	n.b.	224

(1) Inclusief emissie van bestelauto's

(2) Lijnvervoer en niet-lijnvervoer

De Nederlandse CO<sub>2</sub> emissiedoelstelling voor 2010 bedraagt 160 Mton (6% lager dan in 1990). Echter, sinds 1990 is de CO<sub>2</sub>-emissie blijven stijgen tot 182 Mton in het jaar 2000. De komende jaren dient de CO<sub>2</sub>-emissie (t.o.v. 2000) dus met 22 Mton af te nemen, tot de doelstelling van 160 Mton in het jaar 2010. Het emissiereductiepotentieel van alle, in de drie genoemde categorieën, voertuigen bedraagt in de gunstigste case (H2/FC) in totaal circa 13,5 Mton CO<sub>2</sub> equivalenten/jaar (61% van 22 Mton). Hierbij dient wel vermeld te worden dat is uitgegaan van een volledige vervanging van alle in Nederland aanwezige voertuigen binnen de drie genoemde categorieën. Desalniettemin is duidelijk dat brandstofcelvoertuigen een zeer significante bijdrage kunnen leveren aan de CO<sub>2</sub>-emissiereductie in het algemeen en de CO<sub>2</sub>-emissiereductiedoelstelling in het bijzonder.

#### 5.4 Berekening NO<sub>x</sub>-emissiereductiepotentieel

De berekening van het NO<sub>x</sub>-emissiereductiepotentieel van brandstofcelvoertuigen is gegeven in Tabel 14. Alle aannamen van paragraaf 5.2 zijn van kracht. De berekening is op dezelfde wijze uitgevoerd als voor die het CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel. Helaas geven de resultaten een sterke overschatting van het NO<sub>x</sub>-emissiereductiepotentieel. Dit komt omdat in de komende jaren auto's met een relatief hoge NO<sub>x</sub>-emissie geleidelijk vervangen worden door (conventionele) auto's met een veel lagere emissie dankzij een katalysator.

Uit de resultaten blijkt dat maximale potentiële emissiereductie van de personenautosector het grootst is met 89 kton NO<sub>x</sub>/jr, gevolgd door die van lichte vrachtwagens (en bestelauto's) met 22,5 kton NO<sub>x</sub>/jr. Bussen bereiken een maximale emissiereductie van 6,04 kton NO<sub>x</sub>/jr.

Tabel 14: *Berekening well-to-wheels NO<sub>x</sub>-emissiereductiepotentieel in Nederland*

	Personenauto		Lichte vrachtwagen <sup>(1)</sup>		Bussen <sup>(2)</sup>	
	Benz./FC	H2/FC	Diesel/FC	H2/FC	Diesel/FC	H2/FC
Relatieve emissie t.o.v. referentie [%]	20%	20%	16%	13%	n.b.	7%
Oorspronkelijke WTW emissie [kton NO <sub>x</sub> /jr]	111	111	26	26	6,5	6,5
Emissie bij volledige vervanging [kton NO <sub>x</sub> /jr]	22	22	4	3,5	n.b.	0,46
Emissie <i>reductie</i> bij volledige vervanging [kton NO <sub>x</sub> /jr]	89	89	22	22,5	n.b.	6,04

1. Emissie van bestelauto's

2. Lijnvervoer en niet-lijnvervoer

In het Emissiejaarrapport voor Nederland wordt voor het jaar 2005 een NO<sub>x</sub>-emissiedoelstelling genoemd van 249 kiloton. De totale Nederlandse energiegerelateerde uitstoot van NO<sub>x</sub> in 1999 bedroeg 409 kiloton. Dit betekent dat er over alle sectoren een NO<sub>x</sub>-emissiereductie van 160 kiloton gerealiseerd dient te worden. Hier kan de sector wegverkeer wederom een belangrijke rol vervullen. Wanneer in Nederland alle voertuigen van de drie genoemde categorieën worden vervangen door brandstofcelvoertuigen kan, in de gunstigste case (H2/FC), een emissiereductie van circa 117 kiloton NO<sub>x</sub> worden gerealiseerd (73% van 160 kton). Hierbij dient wederom vermeld te worden dat is uitgegaan van een volledige vervanging van alle in Nederland aanwezige voertuigen binnen de drie genoemde categorieën. Desalniettemin is duidelijk dat voertuigen op brandstofcellen een zeer significante bijdrage kunnen leveren aan de NO<sub>x</sub>-emissiereductie in het algemeen en de NO<sub>x</sub>-emissiereductiedoelstelling in het bijzonder.

## 5.5 Berekening PM10-emissiereductiepotentieel

De berekening van het emissiereductiepotentieel voor PM10 van brandstofcelvoertuigen is gegeven in Tabel 15. Alle aannamen van paragraaf 5.2 zijn van kracht. De berekening is op dezelfde wijze uitgevoerd als die voor het CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>-emissiereductiepotentieel.

Uit de resultaten blijkt dat maximale potentiële emissiereductie van de personenautosector het grootst is met 4,0 kton PM10/jr, gevolgd door die van lichte vrachtwagens (en bestelauto's) met 2,4 kton PM10/jr. Bussen bereiken een maximale emissiereductie van 0,47 kton PM10/jr. Deze maximale reducties worden bereikt wanneer de voertuigen binnen de drie vermelde categorieën allen worden voorzien van een brandstofcel waarbij pure waterstof aan de pomp wordt getankt.

De jaargemiddelde PM10-concentratie in Nederland bedraagt ongeveer 40 µg/m<sup>3</sup> [RIVM, 1998]. Naast de bron energieopwekking draagt de bron verkeer in belangrijke mate bij aan deze concentratie. Door reeds geformuleerd Europees (en Nederlands) beleid wordt echter een daling verwacht naar ca. 37 µg/m<sup>3</sup> in 2010, die door aanvullende maatregelen verder kan worden teruggebracht tot 35 µg/m<sup>3</sup> in 2020. Deze daling is echter niet voldoende om de in Europees verband circulerende limiet van 30 µg/m<sup>3</sup> te realiseren. Om in Nederland een jaargemiddelde PM10-concentratie van 30 µg/m<sup>3</sup> te realiseren, is door het RIVM berekend dat door de sector wegverkeer een emissiereductie van 78% dient te worden gerealiseerd.

Tabel 15: Berekening well-to-wheels PM10-emissiereductiepotentieel in Nederland

	Personenauto		Lichte vrachtwagen <sup>(1)</sup>		Bussen <sup>(2)</sup>	
	Benz./FC	H2/FC	Diesel/FC	H2/FC	Diesel/FC	H2/FC
Relatieve emissie t.o.v. referentie [%]	56%	48%	52%	42%	n.b.	15%
Oorspronkelijke WTW emissie [kton PM10/jr]	7,6	7,6	4,1	4,1	0,55	0,55
Emissie bij volledige vervanging [kton PM10/jr]	4,3	3,6	2,1	1,7	n.b.	0,08
Emissie <i>reductie</i> bij volledige vervanging [kton PM10/jr]	3,3	4,0	2,0	2,4	n.b.	0,47

1. Emissie van bestelauto's

2. Lijnvervoer en niet-lijnvervoer

De huidige jaarlijkse PM10-emissie door de sector wegverkeer in Nederland bedraagt 12,25 kiloton. Wanneer in Nederland alle voertuigen van de drie genoemde categorieën worden vervangen door brandstofcelvoertuigen kan, in de gunstigste case (H2/FC), een emissiereductie van circa 6,9 kiloton PM10 worden gerealiseerd (56% van 12,25 kton). Hierbij dient wederom vermeld te worden dat is uitgegaan van een volledige vervanging van alle in Nederland aanwezige voertuigen binnen de drie genoemde categorieën. Desalniettemin is duidelijk dat voertuigen op brandstofcellen eveneens een significante bijdrage kunnen leveren aan de PM10-emissiereductie in het algemeen en de PM10-emissiereductiedoelstelling in het bijzonder.



## 6. DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Hieronder volgt een opsomming van de conclusies uit deze studie. Allereerst zal iets gezegd worden over het binnen de studie uitgevoerde literatuuronderzoek. Vervolgens worden de conclusies gegeven ten aanzien van het te verwachten emissiereductiepotentieel voor het Nederlandse wegverkeer, bij vervanging van voertuigen met interne verbrandingsmotor door brandstofcelvoertuigen.

### 6.1 Emissies wegverkeer Nederland

Van de totale Nederlandse CO<sub>2</sub> uitstoot is 20% een direct gevolg van het brandstofgebruik door verkeer en vervoer [ECN, 2000a]. Volgens EU afspraken moet in 2010 de uitstoot verminderd zijn met 6%. Dit is zonder verdere maatregelen niet haalbaar. Weliswaar zijn voertuigen efficiënter en zuiniger geworden, maar de CO<sub>2</sub> uitstoot blijft gelijk door enerzijds toename van het verkeer en anderzijds doordat voertuigen groter en zwaarder zijn geworden.

Er kan gesteld worden dat vooral de uitstoot van stikstofoxides (NO<sub>x</sub>) en fijn stof (PM10) nog dienen te verminderen. Hoge concentraties van deze stoffen zijn schadelijk voor de gezondheid. Het is de verwachting dat de uitstoot van PM10 en NO<sub>x</sub> in de toekomst zullen dalen, door toepassing van steeds efficiëntere nabehandelingsystemen voor de uitlaatgassen.

Uitstoot van andere schadelijke stoffen, zoals SO<sub>2</sub>, CO en VOS, is in de afgelopen jaren al drastisch verminderd door de ontzweveling van brandstof, toepassing van katalysatoren en efficiëntere motoren. Het is de verwachting dat de uitstoot van deze stoffen in de toekomst nog verder zal dalen.

### 6.2 Literatuuronderzoek

Een well-to-wheels keten is opgebouwd uit verschillende schakels. Er zijn per schakel meerdere alternatieven mogelijk, en per alternatief zijn er vaak meerdere varianten. Hierdoor is een enorm aantal verschillende well-to-wheels ketens te onderscheiden, waardoor er ook zeer veel studies en gegevens beschikbaar zijn met betrekking tot dit onderwerp. De meeste studies gaan over personenauto's met interne verbrandingsmotor. Slechts een beperkt aantal studies beschouwt aandrijving doormiddel van een brandstofcel. Daarvan gaat nog een groot deel over brandstoffen anders dan benzine, diesel of waterstof.

Er worden bij vergelijkbare ketens niet zelden uiteenlopende resultaten gevonden. Dit wordt met name veroorzaakt door verschillen in locatie-specifieke aannamen en omstandigheden, verschillen in technologie-specifieke aannamen en verschillen in berekeningsmethoden. Veruit de meeste studies hebben een Amerikaans perspectief.

Er kan worden gesteld dat de well-to-wheels literatuur voldoet voor het maken van grove schattingen en het identificeren van globale trends. Voor meer betrouwbare inschattingen dient te worden uitgegaan van energie- en emissiekentallen voor de afzonderlijke schakels waaruit de well-to-wheels ketens zijn opgebouwd.

Om nut en noodzaak van ontwikkeling van specifieke technologie op het gebied van brandstofcelvoertuigen te kunnen beoordelen is hiervoor genoemd niveau niet toereikend. Dit vereist meer gedetailleerde tank-to-wheels modellen voor voertuig-, transmissie- en aandrijfsystemen waarmee diverse ritcycli voor specifieke voertuigtypen en de Nederlandse situatie doorgerekend worden!

### 6.3 Emissiereductiepotentieel

Uit de analyse die is uitgevoerd komt naar voren dat brandstofcelvoertuigen ketenbreed tot een significante emissiereductie kunnen leiden. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat bij deze studie voor het bepalen van de emissiereductie is uitgegaan van een volledige vervanging van het huidige Nederlandse wagenpark binnen de beschouwde categorieën, door brandstofcel aangedreven voertuigen. Tevens dient vermeld te worden dat als referentie binnen deze studie een op benzine of diesel bedreven voertuig met interne verbrandingsmotor is genomen, waarbij rekening is gehouden met de toekomstige optimalisatie van deze technologie.

#### 6.3.1 Kooldioxide

Uit de studie blijkt dat het mogelijk is om een CO<sub>2</sub>-emissiereductie van ongeveer 14 Mton per jaar te realiseren. Hiervan wordt 11 Mton door personenauto's, 2,5 Mton door bestelauto's en lichte vrachtwagens en 0,2 Mton door bussen verwezenlijkt. Dit betekent een CO<sub>2</sub>-emissiereductie van circa 45% ten opzichte van de huidige CO<sub>2</sub>-emissie door het wegverkeer. Indien geen gasvormige waterstof wordt getankt maar de huidige brandstoffen aan boord van de voertuigen in waterstof worden omgezet (on-board reforming), leidt dit tot een CO<sub>2</sub>-emissiereductie van circa 20%.

De Nederlandse CO<sub>2</sub>-emissiedoelstelling voor 2010 bedraagt 160 Mton (6% lager dan in 1990). Om deze doelstelling te realiseren dient de komende jaren de CO<sub>2</sub>-emissie (t.o.v. 2000) met 22 Mton af te nemen. Het maximale CO<sub>2</sub>-emissiereductiepotentieel van brandstofcelvoertuigen bedraagt in totaal ongeveer 14 Mton per jaar. Op basis hiervan kan de conclusie worden getrokken dat 61% van de van CO<sub>2</sub>-emissiedoelstelling, bij een volledige vervanging van het huidige Nederlandse wagenpark door brandstofcel aangedreven voertuigen, kan worden gerealiseerd.

#### 6.3.2 Stikstofoxide

Uit de studie blijkt dat het mogelijk is om een NO<sub>x</sub>-emissiereductie van ongeveer 117 kton per jaar te realiseren. Hiervan wordt 89 kton door personenauto's, 22 kton door bestelauto's en lichte vrachtwagens en 6 kton door bussen verwezenlijkt. Dit betekent een NO<sub>x</sub>-emissiereductie van circa 69% ten opzichte van de huidige NO<sub>x</sub>-emissie door het wegverkeer.

In het Emissiejaarrapport voor Nederland wordt voor het jaar 2005 een NO<sub>x</sub>-emissiedoelstelling genoemd van 249 kiloton. Om deze doelstelling te realiseren dient de komende jaren de NO<sub>x</sub>-emissie (t.o.v. 1999) met 160 kton af te nemen. Het maximale NO<sub>x</sub>-emissiereductiepotentieel van brandstofcelvoertuigen bedraagt in totaal ongeveer 117 kton per jaar. Op basis hiervan kan de conclusie worden getrokken dat 73% van de NO<sub>x</sub>-emissiedoelstelling, bij een volledige vervanging van het huidige Nederlandse wagenpark door brandstofcel aangedreven voertuigen, kan worden gerealiseerd.

#### 6.3.3 Fijn stof (PM10)

Uit de studie blijkt dat het mogelijk is om een PM10-emissiereductie van ongeveer 7 kton per jaar te realiseren. Hiervan wordt 4 kton door personenauto's, 2,5 kton door bestelauto's en lichte vrachtwagens en 0,5 kton door bussen verwezenlijkt. Dit betekent een PM10-emissiereductie van circa 55% ten opzichte van de huidige PM10-emissie door het wegverkeer.

Berekeningen [RIVM] hebben aangetoond dat tussen nu en 2020 door de sector wegverkeer een PM10-emissiereductie van 78% dient te worden gerealiseerd, m.a.w. 10 kton. Het maximale PM10-emissiereductiepotentieel van brandstofcelvoertuigen bedraagt in totaal ongeveer 7 kton per jaar. Op basis hiervan kan de conclusie worden getrokken dat 70% van deze PM10-emissiedoelstelling, bij een volledige vervanging van het huidige Nederlandse wagenpark door brandstofcel aangedreven voertuigen, kan worden gerealiseerd.

## REFERENTIES

- Ahlvik,P. and Å.Brandberg (2001): *Well-to-wheel Efficiency for alternative fuels from natural gas or biomass*; **2001:85**; ISSN 1401-9612; [www.vv.se](http://www.vv.se)
- Albert Sobey and Associates (2001): *Research and development of proton-exchange-membrane (PEM) fuel cell systems for transportation applications*; Allison Gas Turbine division, Steven G.Chalk, Indianapolis, In 46206, **Contract DE-AC02\_90CH10435**
- CBS (2001): *Statistisch Jaarboek 2001 (CD-rom)*; Centraal Bureau voor de Statistiek, **2001**; [www.cbs.nl](http://www.cbs.nl); [www.cbs.nl/nl/statline](http://www.cbs.nl/nl/statline)
- Chase,A. (1995): *The Future of Fuels for Urban Transportation - Environmentally Sustainable Options*; Imperial college of Science, Technology and Medicine - University of London,
- Commission of the European Communities: *Communication from the commission to the council, the european parliament, the economic and social committee and the committee of the regions on alternative fuels for transportation and on a set of measures to promote the use of biofuels*, Commission of the European Communities, GOL(01)77X1, BI(01)35X1, Brussels, 28/06/2001.
- DeCicco,J. and M.Ross (1994): *Improving Automotive Efficiency*; **Scientific American (December 1994): 30-35**
- ECN (2000a): *Energieverslag Nederland 2000*; [www.ecn.nl/unit\\_bs/evn/index.html](http://www.ecn.nl/unit_bs/evn/index.html)
- ECN (2000b): *Energieverslag Nederland 2000*; [www.ecn.nl/unit\\_bs/evn/index.html](http://www.ecn.nl/unit_bs/evn/index.html)
- Guzella,L.A.A. (1999): *Fahrzeugantriebssysteme*; laboratorium fur Motorsysteme ETH Zurich, Zurich (CH), **31-265**
- Hart,D. and G.Hormandinger (1997): *Initial Assessment of the environmental characteristics of fuel cells and computing technologies: Volume 1*; W.S.Atkins Environment, **ETSU F/02/00111/**
- Hart,D. and G.Hormandinger (2001): *Environmental benefits of transport and stationary fuel cells*; **Journal of Power Sources 71: 348-353**
- Hörmandinger,G. and N.J.D.Lucas (1996): *Is Clean Enough? The Influence of Environmental Externalities on Markets for Fuel cells in Transport*; **Transportation Research and development 1 (1): 63-78**
- Knorr,H., W.Held, W.Prumm and H.Rüdiger (1997): *The MAN Hydrogen Propulsion System for City Buses*; **Internatonal Journal Hydrogen Energy 23 (3): 201-208**
- NREL (2002): *ADVISOR 3.2*; <http://www.ctts.nrel.gov/analysis/demo>

- Ogden, J.M., Margaret M. Steinbugler and Thomas G. Kreutz (2001): *A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development*, **Journal of Power Sources 79(1999): 143-168**
- Pembia, T.P.I.f.A.D. (2000): *Climate-Friendly Hydrogen Fuel: A comparison of the Life-Cycle greenhouse Gas Emissions for selected Fuel Cell vehicle Hydrogen Production systems*; ISBN 0-921719-30-2; [www.pembia.org](http://www.pembia.org); [www.davidsuzuki.org](http://www.davidsuzuki.org)
- RIVM (1997): *CO2 emissiereductie door wegverkeer, verkenning van vergaande maatregelen*; **773002001**
- RIVM (2000b): *Ecological, Social and Economic Evaluation of transport Scenarios: an integral approach*; **773002014**
- RIVM (2000c): *Verkeer en vervoer in de Nationale Milieuverkenning 5*; **408129014**
- RIVM (2001): *Energieverbruik door mobiele bronnen*; **Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu**; [www.rivm.nl/milieucompndium/maatschappelijke\\_ontwikkelingen/a5\\_verkeer\\_en\\_vervoer/a5.7\\_energieverbruik\\_door\\_mobiele\\_bronnen](http://www.rivm.nl/milieucompndium/maatschappelijke_ontwikkelingen/a5_verkeer_en_vervoer/a5.7_energieverbruik_door_mobiele_bronnen)
- RIVM and CBS (2000a): *Milieucompndium-het milieu in cijfers*;
- RIVM (1998): *Fijn stof in Nederland. Een tussenbalans*; **Rapport nr. 650010 006**
- Rohland, B., J Nitsch and H Wendt (1992): *Hydrogen and Fuel Cells - The clean energy system*; **Journal of Power Sources 37: 271-277**
- Schurig, V. (2001): *Analyse von Kraftstoffketten*; Ludwig-bolkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn,
- Wallace, J.P., M.Q.Wang, Trudy Weber and Anthony Finizza (2001): *Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel /Vehicle Systems -north american analysis - Volume 1&2*; [www.transportation.anl.gov](http://www.transportation.anl.gov)
- Wang, M.Q. (1999a): *REET 1.5 Transportation Fuel-Cycle Model, Volume 1: Methodolgy, Use and Results*; Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, **ANL/ESD-39, Vol 1**; [www.transportation.anl.gov](http://www.transportation.anl.gov)
- Wang, M.Q. (1999b): *REET 1.5 Transportation Fuel-Cycle Model, Volume 2: Appendices of Data and Results*; Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, **ANL/ESD-39, Vol 2**; [www.transportation.anl.gov](http://www.transportation.anl.gov)
- Weiss, M.A., John B. Heywood, Elisabeth M. Drake, Andreas Schafer and Felix f. Auyeung (2000): *On the road in 2020 – A life cycle analysis of new automobile technologies*; Energy laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139-4307, **Energy laboratory report MIT EL 00-003**; <http://web.mit.edu/energylab/www/>

## BIJLAGE A ACRONIEMEN

Benz	Benzine
CBS	Centraal Bureau voor de Statistiek
CNG	Compressed Natural Gas (gecomprimeerd aardgas)
CO	Koolstofmonoxide
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide
CVT	Continu variabele transmissie
DME	Dimethylether (een dieselvervanger)
EC scenario	Scenario voor de ontwikkeling van de energievraag binnen Europa
EtOH	Ethanol
FC	Fuel Cell (brandstofcel)
FT-diesel	Fischer Tropsch Diesel (synthetische diesel )
GH <sub>2</sub>	Gasvormig waterstof
H <sub>2</sub>	Waterstof
ICE	Internal Combustion Engine (interne verbrandingsmotor)
LCA	Levenscyclusanalyse
LDT	Light duty truck (kleine vrachtauto of bestelwagen)
LH <sub>2</sub>	Liquified Hydrogen (vloeibaar waterstof)
LNG	Liquified Natural Gas (gecomprimeerd aardgas)
LPG	Liquified Petroleum Gas
NO <sub>x</sub>	Stikstofoxiden
MeOH	Methanol
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MV5	Nationale Milieuverkenningen 5
N <sub>2</sub> O	Distikstofoxide
NMP3	Nationaal Milieubeleidsplan 3
PAFC	Phosfor Alkaline Fuel Cell
PE	Polymer Electrolyte
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cel
PM10	Particulate matter 10 (kleine stof deeltjes met een diameter beneden 10µm)
PSC	Passenger car
SI	Spark Ignition (ontbranding middels externe ontsteking, bougie)
SIDI	Spark Ignition Direct Injection (als SI + directe brandstofinjection)
SO <sub>2</sub>	Zwavel dioxide
SPFC	Solid Polymer Fuel Cell (=PEMFC)
TTW	Tank-to-Wheels
VOS	Volatile Organic Substances (vluchtige organische stoffen)
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheels

## BIJLAGE B OVERZICHT VEELGEBRUIKTE STUDIES

Overzicht van veel geciteerde en recente well-to-wheels studies. **Vetgedrukte** referenties zijn nader verwerkt in deze studie. Indien geen brandstofcellen in de desbetreffende referentie worden behandeld dan is dit bij de omschrijving onderstreept weergegeven.

Auteur/instituut	Jaar	Korte omschrijving, opmerkingen
Delucchi	1991 1993 1997	Uitvoerige studie naar broeikasgas- en andere lucht-emissies voor groot aantal well-to-wheels ketens. <u>Geen brandstofcellen.</u> Heeft de basis gevormd voor GREET 1.0. Broeikasgasemissies zijn geschat voor een benzine-auto in het jaar 2000 met een verbruik van 30 mijl/gallon (12,8 km/l). Voor alternatieve brandstof/voertuig combinaties zijn efficiency verbeteringen geschat t.o.v. de benzine-auto. Geeft ook energieverbruik voor productie en onderhoud van voertuigen en productiefaciliteiten voor brandstoffen.
NREL	1991 1992	CO <sub>2</sub> - en andere luchtmissies voor 2000 en 2010 bij inzet van ethanol brandstoffen op basis van biomassa en huishoudelijk afval, en verbeterde benzine (zwavel- en bezeen-arm). <u>Geen brandstofcellen</u>
Bently et al.	1992	CO <sub>2</sub> -emissies voor voertuigen met verbrandingsmotor en voor elektrische- en brandstofcelvoertuigen gevoed met verschillende brandstoffen. Drie type voertuigen (kleine en grote auto, en een kleine bestelbus) en zes verschillende primaire energie/brandstofketens zijn bekeken. Geen diepgaande analyse van well-to-tank deel, maar wel gedetailleerde toekomstverwachtingen voor voertuigconfiguraties en efficiency van componenten voor 2001, 2010 en 2020. Voertuigmodellen zijn gemaakt m.b.v. het SIMPLEV simulatie programma.
Brogan and Venkateswaran	1992	Studie naar well-to-wheels energieverbruik en CO <sub>2</sub> -emissies voor 19 brandstof/aandrijfsysteem opties (zowel ICEV, EV, FCV en hybrides) voor een Amerikaanse middenklasser in 2001. Meeste gegevens voor alternatieve aandrijfsystemen (componenten) komen uit de studie van Bently. Optimistische aannamen batterijtechnologie. Onvolledige emissiegegevens voor well-to-tank deel.
Ecotrafic	1992	Energieverbruik, broeikasgas- en andere luchtmissies voor een elektrische en ICE uitvoering van een personenauto, kleine vrachtauto en bus. <u>Geen brandstofcellen.</u> Meerdere well-to-tank routes o.b.v. aardolie, aardgas, biomassa en zon als primaire bron. Gegevens voor Zweedse situatie waar slechts 5% van de elektriciteit afkomstig is van koolstofhoudende bronnen.
Wang and Santini	1993	Broeikasgas- en andere luchtmissies voor een elektrische en benzine auto voor verschillende ritcycli in 4 steden in de VS (verschillende mix elektriciteitsproductie). <u>Geen brandstofcellen.</u> Voertuigsimulatie met vroege versie van Argonne National Laboratory EAGLES programma. Onvolledige emissiegegevens voor well-to-tank deel.
Darrow	1994a 1994b	Broeikasgas- en andere emissies voor een elektrisch en ICE aangedreven minivan. <u>Geen brandstofcellen.</u> Verschillende brandstoffen op basis van aardolie, aardgas en biomassa. Gegevens elektriciteitsproductie voor de VS en Californië.

Accurex	1996	Broeikasgas- en andere emissies voor EV en ICEV in 2010 bij 3 scenario's voor voertuigefficiëntie. <u>Geen brandstofcellen</u> . Groot aantal well-to-tank ketens bekeken met variatie brandstofmix voor elektriciteit. Grondig beeld voor emissies brandstofproductieprocessen in Californië.
<b>Hart and Hörmandiger</b>	<b>1997</b>	Een ETSU-studie aangaande een eerste beoordeling van de milieukarakteristieken van brandstofcel aangedreven personenauto's en bussen in Engeland. Nagenoeg alle emissies worden voor de WTT, TTW en WTW keten in duidelijke tabellen (inclusief gevoeligheidsanalyse) weergegeven.
Höhlein et al.	1998	Well-to-wheels analyse voor 3 ICE voertuigen (benzine, diesel, CNG) en 4 brandstofcelvoertuigen (methanol, H <sub>2</sub> , benzine). Vergelijking uitgevoerd o.b.v. van de New European Drive Cycle (NEDC).
Argonne Nat. Lab.	1998	Impact van elektrisch vervoer t.o.v. benzine op energiegebruik, broeikasgas- en andere luchtmissies in 4 steden in de VS tussen 1998 en 2010. <u>Geen brandstofcellen</u> . Voertuigsimulatie m.b.v. Argonne voertuig model. Inclusief data m.b.t. energiegebruik en emissies in voertuigketen.
Sheenan et al.	1998	NREL studie voor DOE naar impact op well-to-wheel energieverbruik en emissies bij gebruik van biodiesel i.p.v. gewone diesel in stadsbussen. <u>Geen brandstofcellen</u> .
Directed Technologies Inc.	1998	Broeikasgas- en andere luchtmissies voor een personen-auto met hybride (diesel, CNG en H <sub>2</sub> ) en brandstofcel (H <sub>2</sub> , methanol en benzine) krachtbron, als onderdeel van studies voor Ford en DOE. Well-to-tank gegevens afkomstig van Delucchi aangevuld met emissies voor waterstofproductie. Schatting van energieverbruik voertuig m.b.v. een voertuigsimulatiemodel. Daarnaast kostenschattingen voor alternatieve voertuigen, brandstof en maatschappelijke kosten.
Arthur D. Little	1999	Studie voor DOE naar alternatieve brandstoffen voor brandstofcelvoertuigen. Schatting van well-to-wheels energie efficiëntie, broeikasgasemissies en NO <sub>x</sub> .
<b>Wang</b>	<b>1999</b> <b>2000</b>	GREET 1.5/1.5a model met uitgebreide database voor het inschatten van energieverbruik, broeikasgassen en andere luchtmissies voor 3 type voertuigen en een groot aantal korte en lange termijn voertuigopties (o.a. brandstofcellen) en brandstoffen. Energieverbruik en emissies van voertuigen zijn geschat op basis van literatuurgegevens. Thans ontwikkeling GREET 1.6 en GREET 3.0 voor zwaardere voertuigen (vrachtauto's, bussen)(Wang, 1999a; Wang, 1999b)
<b>Pembia Institute</b>	<b>2000</b>	(Pembia, 2000)
Methanex	2000	Energieverbruik en broeikasgasemissies voor brandstofcel voertuigen (methanol, benzine, FT-diesel en H <sub>2</sub> ) in vergelijking met een benzine voertuig in 2010. Canadese context. Gegevens uit literatuur. Gebruik model Delucchi voor impact alternatieven op voertuiggewicht. Gegevens m.b.t. relatieve efficiëntie (voor een real world ritcyclus voor Noord-Amerika) van brandstofcelvoertuigen uit studies van Directed Technologies Inc.



<b>MIT</b>	<b>2000</b>	Koolstofemissies en energieverbruik voor Amerikaanse middenklasser in 2020 met o.a. een benzine of diesel ICE of hybride, of een brandstofcel op benzine, methanol of H <sub>2</sub> . Well-to-tank emissies o.b.v. literatuur (incl. GREET). Gebruik van gedetailleerd voertuigmodel voor simulatie van energieverbruik tijdens ritcyclus (o.b.v. ETH, Zürich, Matlab Simulink simulatie programma). Daarnaast schatting van energieverbruik en kosten voor productie van toekomstige voertuigen. (Weiss, 2000)
<b>Wallace</b>	<b>2001</b>	In samenwerking met Argonne National Laboratory. Energieverbruik en broeikasgasemissies beyond 2005 voor 27 voertuig/brandstof combinaties voor een full size pick-up truck. ICE-, hybride- en brandstofcelaandrijving. Omvangrijke well-to-tank analyse (75 routes) m.b.v. GREET. Voertuigsimulaties met GM in-house software (Hybrid Powertrain Simulation Program, HPSP). (Wallace, 2001)
<b>Ecotraffic</b>	<b>2001</b>	Well-to-wheels efficiency voor een gemiddelde Zweedse auto in 2010-2015 met ICE of brandstofcel en gevoed met alternatieve brandstoffen o.b.v. aardgas en biomassa. Well-to-tank analyse o.b.v. literatuur voor Zweedse situatie. Voertuigsimulatie m.b.v. Advisor 3.0, met correctie van model voor koude start. Uitgebreide vergelijking met recente well-to-wheels studies.(Ahlvik, 2001)

## BIJLAGE C LITERATUURDATA

nr	reference	first author	year of ref.	institute	vehicle type	year of evaluation	vehicle cases	fuel feedstock	location and/or size production process	fuel	engine	transmission	
<b>Passenger, Benz/ICE</b>													
205	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2000	Argonne nat. lab	passenger	2000	baseline conventional gasoline	petroleum	centralized	gasoline	SI	unk	55%FUDS-45%FHDS
206	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2010	Argonne nat. lab	passenger	2001	baseline conventional gasoline	petroleum	centralized	gasoline	SI	unk	55%FUDS-45%FHDS
169	Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Jamin, Y.	2000	Pembina Institute	passenger	n.a.	Reference vehicle ICE	petroleum	centralized	gasoline	SI	auto	55%FUDS-45%FHDS
157	On the road in 2020	Weiss, M.A.	2000	MIT	passenger	1996	Reference vehicle ICE	petroleum	centralized	gasoline	SI	auto	55%FUDS-45%FHDS
2	ETSU Env.Chars.of FC's	D.Hart	1997	W.S. Atkins Env.	passenger	2000	reference vehicle	petroleum	centralized	gasoline	SI	unk	
158	On the road in 2020	Weiss, M.A.	2000	MIT	passenger	2020	Evolutionary vehicle ICE	petroleum	centralized	gasoline	DI SI	auto-clutch	55%FUDS-45%FHDS
159	On the road in 2020	Weiss, M.A.	2000	MIT	passenger	2020	Advanced vehicle ICE	petroleum	centralized	gasoline	DI SI	auto-clutch	55%FUDS-45%FHDS
<b>Passenger, Benz/FC</b>													
170	Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Jamin, Y.	2000	Pembina Institute	passenger	n.a.	Reference vehicle FC	petroleum	centralized	gasoline	FC	auto	55%FUDS-45%FHDS
165	On the road in 2020	Weiss, M.A.	2000	MIT	passenger	2020	Advanced vehicle FC Hybrid	petroleum	centralized	gasoline	FC + battery	direct	55%FUDS-45%FHDS
209	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2010	Argonne nat. lab	passenger	2004	baseline conventional gasoline	petroleum	centralized	gasoline	FC	unk	55%FUDS-45%FHDS
<b>Passenger, H2/FC</b>													
174	Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Jamin, Y.	2000	Pembina Institute	passenger	n.a.	Reference vehicle FC	natural gas	decentralized electrolysis	hydrogen gas	FC	auto	55%FUDS-45%FHDS
167	On the road in 2020	Weiss, M.A.	2000	MIT	passenger	2020	Advanced vehicle FC Hybrid	natural gas	decentralized reforming	hydrogen gas	FC + battery	direct	55%FUDS-45%FHDS
208	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2010	Argonne nat. lab	passenger	2003	baseline conventional gasoline	natural gas	centralized	H2	FC	unk	55%FUDS-45%FHDS
207	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2010	Argonne nat. lab	passenger	2002	baseline conventional gasoline	natural gas	centralized	H2	FC	unk	55%FUDS-45%FHDS
173	Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Jamin, Y.	2000	Pembina Institute	passenger	n.a.	Reference vehicle FC	natural gas	decentralized reforming	hydrogen gas	FC	auto	55%FUDS-45%FHDS
172	Climate-Friendly Hydrogen Fuel	Jamin, Y.	2000	Pembina Institute	passenger	n.a.	Reference vehicle FC	natural gas	centralized reforming	hydrogen gas	FC	auto	55%FUDS-45%FHDS
<b>Light truck, Dies/ICE</b>													
8	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	1999	Argonne nat. lab	LTD type 2	1999	reference vehicle	petroleum	centralized	conv gasoline	BIDI	unk	55%FUDS-45%FHDS
30	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2000	Argonne nat. lab	LTD type 2	2000	diesel	petroleum		diesel	CIDI	unk	55%FUDS-45%FHDS
176	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle ICE	petroleum	centralized	diesel	DI CI	auto	55%FUDS-45%FHDS
<b>Light truck, Dies/FC</b>													
164	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle FC	petroleum	centralized	gasoline	FC	direct	55%FUDS-45%FHDS
167	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle FC Hybrid	petroleum	centralized	gasoline	FC + battery	direct	55%FUDS-45%FHDS
<b>Light truck, H2/FC</b>													
198	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle FC	natural gas	centralized reforming	liquid hydrogen	FC	direct	55%FUDS-45%FHDS
199	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle FC Hybrid	natural gas	centralized reforming	liquid hydrogen	FC + battery	direct	55%FUDS-45%FHDS
194	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle FC	natural gas	decentralized reforming	hydrogen gas	FC	direct	55%FUDS-45%FHDS
196	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle FC	natural gas	centralized reforming	hydrogen gas	FC	direct	55%FUDS-45%FHDS
195	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle FC Hybrid	natural gas	decentralized reforming	hydrogen gas	FC + battery	direct	55%FUDS-45%FHDS
197	WellHo-Wheel Energy Use	Wallace, J.P.	2001	GMANL	light truck	2005	Reference vehicle FC Hybrid	natural gas	centralized reforming	hydrogen gas	FC + battery	direct	55%FUDS-45%FHDS
120	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2000	Argonne nat. lab	LTD type 2	2010	FCV H2	natural gas	decentralized	Hydrogen	FC	unk	55%FUDS-45%FHDS
122	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2000	Argonne nat. lab	LTD type 2	2010	FCV H2	natural gas	centralized	liquid Hydrogen	FC	unk	55%FUDS-45%FHDS
119	BREET 1.5 Transportation Fuel-C	M.Q.Wang	2000	Argonne nat. lab	LTD type 2	2010	FCV H2	natural gas	centralized	Hydrogen	FC	unk	55%FUDS-45%FHDS
<b>Bus, Dies/ICE</b>													
7	ETSU Env.Chars.of FC's	D.Hart	1999	W.S. Atkins Env.	bus	2000	reference vehicle	petroleum	centralized	diesel	CI	unk	
149	Environmental benefits of transport	D.hart	1998	Centre for env tec	bus		bus	petroleum	centralized	diesel	CI/CE		
<b>Bus, Dies/FC</b>													
<b>Bus, H2/FC</b>													
5	ETSU Env.Chars.of FC's	D.Hart	1997	W.S. Atkins Env.	bus	prov:techn	fuel cell	natural gas	centralized	hydrogen	SPFC	unk	
150	Environmental benefits of transport	D.hart	1998	Centre for env tec	bus		fuel cell	natural gas	centralized	hydrogen	SPFC		
6	ETSU Env.Chars.of FC's	D.Hart	1998	W.S. Atkins Env.	bus	prov:techn	fuel cell	natural gas	centralized	hydrogen	PAFC	unk	
151	Environmental benefits of transport	D.hart	1998	Centre for env tec	bus		fuel cell	natural gas	centralized	hydrogen	PAFC		

