

Nieuwe aandrijfvormen voor auto's

Private en vermeden externe kosten

Tina VERVLOESSEM

promotor :
Prof.dr.ir Frans LEMEIRE

VOORWOORD

Deze eindverhandeling kwam tot stand als laatste taak in de opleiding tot het verkrijgen van het diploma Master in de Economie, Handelsingenieur. Het onderwerp 'Nieuwe aandrijfvormen voor auto's. Private en vermeden externe kosten' bood de kans om het technologische met het economische te verenigen en belichaamt daardoor mijn afstudeerrichting Technologie. Bovendien is het onderwerp van de klimaatverandering meer en meer een 'hot topic' en niet langer te negeren.

Vooraleer aan te vatten met de tekst, zou ik graag de kans grijpen om iedereen te bedanken die mij met raad en daad heeft bijgestaan. Allereerst wil ik mijn promotor Prof. dr. ir. Lemeire bedanken voor zijn hulp. Ook Prof. Ir. Pecqueur van de Karel de Grote-Hogeschool ben ik zeer dankbaar voor zijn deskundige uitleg, hulp en alle informatie die hij mij gegeven heeft. Dhr. Heremans, verdeler van Volvo in Heist-op-den-Berg, ben ik eveneens zeer erkentelijk voor de tijd die hij voor mij heeft willen vrijmaken. Ik wil ook een warm en welgemeend bedankt richten aan Dhr. Lenaers van VITO voor alle informatie die hij mij bezorgde.

Verder ben ik mijn ouders, zussen en vriend mijn dank verschuldigd voor hun steun en raad gedurende het tot stand komen van deze eindverhandeling en mijn hele studentenloopbaan.

Tina

SAMENVATTING

De westerse maatschappij wordt geconfronteerd met een energieproblematiek die twee oorzaken kent. Enerzijds is er de opwarming van de aarde, een onderwerp dat de laatste tijd bijna dagelijks in de media komt, en anderzijds is de westerse wereld sterk afhankelijk van de olie-import vanuit enkele politiek instabiele landen. Bovendien zijn de fossiele brandstoffen uitputbaar. Deze problematiek weerspiegelt de noodzaak om op zoek te gaan naar alternatieve brandstoffen.

Het broeikas effect wordt veroorzaakt door de uitstoot van broeikasgassen, waarvan CO₂ het belangrijkste is. Om de opwarming van de aarde tegen te gaan werd internationaal het Kyoto-protocol ondertekend, waarin de landen die het ondertekenden zich ertoe verbonden om de uitstoot van zes broeikasgassen te verminderen. Inspanningen om de emissies van deze zes broeikasgassen - CO₂ (koolstofdioxide), N₂O (lachgas), CH₄ (methaan) en fluorverbindingen, namelijk PFK's, HFK's en SF₆ - te verminderen dienen in alle sectoren te gebeuren. Zowel de bouwsector, de industrie, de landbouw, de gezinnen als de transportsector dienen hun steentje bij te dragen. Omdat het probleem zeer breed is, wordt het verder afgebakend tot de transportsector en meer bepaald tot de personenwagens.

De fossiele energiebronnen zijn eindig en zouden over enkele decennia uitgeput kunnen zijn. Bovendien brengt het gebruik van deze fossiele brandstoffen gevolgen met zich mee op ecologisch en economisch vlak. Het gebruik van de wagen wordt meer in detail bekeken. De uitlaatgassen bevatten verschillende schadelijke stoffen die een invloed hebben op de menselijke gezondheid en op het milieu. Niet alleen de opwarming van de aarde, maar ook zure regen, ozon- en smogvorming behoren tot deze milieu-effecten. Auto's zijn bovendien verantwoordelijk voor een groot deel van de lawaaihinder die de Vlaamse bevolking ondervindt en ze nemen ruimte in beslag. De meeste verkeersemissies volgen een dalende trend, enkel CO₂ volgt die evolutie niet. Dit neemt niet weg dat de verschillende schadelijke componenten zoals fijn stof en NO_x-uitstoot zich nog een heel stuk boven hun doelwaarde bevinden. Er moeten bijgevolg nog inspanningen geleverd worden.

Het gebruik van de wagen brengt verschillende effecten met zich mee waar de weggebruiker bij de keuze van zijn transportmiddel geen rekening mee houdt. Deze effecten hebben echter wel een invloed voor de rest van de maatschappij en worden externe effecten genoemd. Deze effecten moeten geïnternaliseerd worden zodat het echte maatschappelijke optimum kan bereikt worden. Anders wordt er teveel gereden. De marginale externe kosten worden bekeken, de externe kosten die worden veroorzaakt doordat er een bijkomende voertuigkilometer gereden wordt. De eerste categorie zijn de marginale externe congestiekosten. Een bijkomende weggebruiker zorgt ervoor dat de tijdskosten van de andere weggebruikers toenemen en hun snelheid daalt. In spitsuren zijn de externe congestiekosten groter dan in daluren en in stedelijke gebieden zijn ze hoger dan op

het platteland omdat er dan meer mensen door de vertragingen getroffen worden. Een tweede groep externe kosten zijn de marginale externe ongevalkosten. Deze bestaan uit de kosten verbonden aan het eigen ongevalrisico, de kosten verbonden aan de verandering van de gemiddelde ongevalkosten voor de andere weggebruikers en de aanpassingskosten die andere weggebruikers dragen. In België liggen deze hoger dan in het buitenland door het grotere gevoel van onveiligheid dat de mensen hier hebben. Vervolgens zijn er de marginale externe milieukosten. De belangrijkste conclusies in verband met de externe milieukosten zijn dat deze kosten significant zijn, afhankelijk van de locatie (in de stad zijn de externe milieukosten veel hoger dan op het platteland), de technologie en de brandstof. Er moet echter rekening gehouden worden met een aanzienlijke onzekerheid. Ook lawaaihinder, plaatsgebruik, geurhinder en lichthinder van het vervoer veroorzaken externe kosten.

Om de externe kosten te internaliseren kunnen er verschillende pistes gevolgd worden. De beste manier om dit te realiseren is een integrale aanpak, door zowel van brandstofbelastingen gebruik te maken als een gedragsverandering bij het publiek trachten te verwezenlijken of subsidies toe te kennen aan het onderzoek naar alternatieven.

Een onderdeel van de externe milieukosten zijn de kosten van de klimaatverandering veroorzaakt door de uitstoot van broeikasgassen. Het Kyoto-protocol is een eerste stap naar het doel om gevaarlijke menselijke inmenging in het klimaatsysteem te voorkomen. Het schrijft kwantitatieve beperkingen voor de deelnemende landen voor. Zo moet België in de periode 2008 tot 2012 de broeikasgasemissies met 7,5 % verlagen. Het Protocol trad in februari 2005 in werking. Om de uitstootreducties te verwezenlijken op een kosten-effectieve manier, definieert het Kyoto-protocol drie innovatieve flexibiliteitsmechanismen. Het Clean Development Mechanisme laat toe dat deelnemende Annex I-landen projecten implementeren in niet-Annex I-landen dewelke hun emissies verlagen. Een tweede mechanisme is de Joint Implementation waarbij een deelnemend Annex I-land projecten uitvoert om de emissies van een ander Annex I-land te doen dalen. Aan beide mechanismen is wel een grote administratieve kost verbonden omdat steeds de referentiesituatie moet gemeten worden en de verandering van de situatie door uitvoering van het project. De vermindering van de uitstoot moet dus gekwantificeerd worden. Ten slotte kunnen de deelnemende landen gebruik maken van Emission Trading of de handel in emissierechten. Landen die nog overschot hebben voor ze hun quotum halen kunnen rechten verkopen aan landen die hun quotum overschrijden. Er heerst grote onzekerheid rond wat de kost zal zijn wanneer er niets aan de hoge CO₂-uitstoot wordt gedaan en wat de precieze impact van uitstootreducties is. De voordelen ervan zijn onduidelijk en ontastbaar. Bovendien reikt het probleem van de opwarming van de aarde verder dan de ambtstermijn van regeringen. Deze aspecten bemoeilijken het opstellen van een internationaal akkoord. De transportsector kent de laatste jaren een stijging van de broeikasgasuitstoot. De CO₂ die door personenwagens werd uitgestoten tussen 1995 en 2003 nam toe met 30 %. De Europese auto-industrie neemt het vrijwillig op zich om de CO₂-uitstoot van

nieuwe auto's te verminderen door tegen 2008 een doel van 140 g/km vast te stellen. De verdieselijking van het wagenpark heeft reeds geleid tot een daling van de CO₂-uitstoot, maar de toename van het aantal wagens werkt deze daling tegen. Ook een stijging van het voertuiggewicht en een toename van het energieverbruik door een aantal opties zoals airconditioning verhogen de emissie van CO₂ dan weer. Dieselwagens stoten dan weliswaar minder CO₂ uit dan benzinevoertuigen, maar hebben dan weer andere schadelijke effecten die meer uitgesproken zijn dan bij benzinevoertuigen zoals de emissie van fijn stof. Over het algemeen genomen zijn dieselwagens veel slechter voor het milieu dan benzinevoertuigen.

Wanneer alternatieve brandstoffen worden bekeken, blijkt dat aardgas een lage uitstoot heeft van verschillende vervuilende stoffen, maar relatief veel onverbrande methaan uitstoot, wat een belangrijk broeikasgas is. Waterstof kan uit zowat elke primaire energiebron gewonnen worden. De productie kan gebeuren met behulp van elektrolyse, wat het potentieel biedt om tot een echte nuluitstoot te komen wanneer hernieuwbare bronnen zoals zon- of windenergie gebruikt worden. Elektrolyse is zeer energie-intensief en momenteel nog duur. De meest gebruikte methode om waterstof te produceren is op dit moment stoomreformatie van aardgas. Wanneer de huidige elektriciteitsmix gebruikt wordt voor de elektrolyse zorgt dit procédé voor een hogere uitstoot van broeikasgassen dan de reformatie van aardgas. Ook uit biomassa kan waterstof verkregen worden.

De grote uitdaging voor transporttoepassingen op basis van waterstof is hoe men genoeg waterstof kan opslaan in een voertuig om het voldoende autonomie te verlenen. Bovendien moet er rekening gehouden worden met beperkingen op het vlak van kost, gewicht, volume, efficiëntie en veiligheid. Het probleem is dat waterstof een zeer kleine energie-inhoud per volume-eenheid bezit. Het moet dus opgeslagen worden onder zeer hoge druk of vloeibaar gemaakt worden waarvoor veel energie nodig is omdat waterstof pas bij -253 °C of 20 K vloeibaar wordt. Bij het vloeibaar maken zou dan ook 30 % van de energie-inhoud verloren gaan. Metaalhydrides, chemische hydrides en koolstofnanotubes zijn opslagtechnieken waar veel onderzoek naar gebeurt. Ook de distributie van waterstof zorgt momenteel nog voor problemen door de vluchtigheid van waterstofgas. Door de kleine atomen gaat het gemakkelijk lekken. Bovendien zijn er zeer grote investeringen vereist wanneer men een tankinfrastructuur wil uitbouwen. Maar wanneer er onvoldoende voertuigen op waterstof zijn, wil niemand deze investeringen doen. Indien er echter geen tankinfrastructuur is, wil men geen waterstofwagens – hetzij met een verbrandingsmotor, hetzij gebruik makend van een brandstofcel – op grote schaal produceren omdat ze nergens van brandstof kunnen worden voorzien. Het vraagstuk van de kip of het ei speelt hier mee. Elektriciteit kan veel efficiënter rechtstreeks gebruikt worden dan opgeslagen te worden onder de vorm van waterstof. Bijna alle autoconstructeurs houden zich bezig met het onderzoek naar het gebruik van waterstof in personenwagens en de ontwikkeling van prototypes. Zowel de waterstofverbrandingsmotor als de brandstofcel krijgen de nodige aandacht.

Ook biobrandstoffen bieden mogelijkheden tot de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen en schadelijke stoffen. In België wordt men echter geconfronteerd met een beperkt landbouwareaal. Om één wagen een jaar te laten rijden, is een hectare landbouwgrond nodig. De elektrische wagen biedt ook mogelijkheden tot een nuluitstoot van broeikasgassen of schadelijke stoffen, maar heeft slechts een zeer beperkte autonomie. De batterijen zijn nog relatief groot, zwaar en duur. Deze wagen is wel veel efficiënter dan een benzinewagen. Remenergie kan gerecupereerd worden en wanneer het voertuig stilstaat wordt de motor gewoon uitgezet. De hybride wagen overwint het nadeel van de lage autonomie, maar maakt wel nog gebruik van benzine of diesel. Deze kan ook remenergie recupereren en zorgt voor een daling van de emissies en het brandstofverbruik. Ook een brandstofcel zorgt ervoor dat er elektrisch kan gereden worden en heeft een veel hogere efficiëntie dan een benzinewagen. Een brandstofcel kan ingezet worden voor decentrale elektriciteitsproductie en kan altijd gebruikt worden omdat men niet afhankelijk is van de zon of de wind bijvoorbeeld. De milieuvriendelijkheid is volledig afhankelijk van de manier waarop de gebruikte waterstof geproduceerd werd.

Er zijn verschillende soorten brandstofcellen, maar de PEM of Proton Exchange Membrane wordt het meest gebruikt in transporttoepassingen doordat ze een lage opstarttemperatuur heeft. De beschouwde autoconstructeurs gebruiken allemaal een PEM-brandstofcel voor hun personenwagens. De opslag en distributie van waterstof evenals de verbetering van brandstofcellen en waterstofverbrandingsmotoren zijn het voorwerp van heel wat onderzoek. Voordat brandstofcellen gecommercialiseerd kunnen worden moeten vooral de kost, het gewicht en de grootte van de brandstofcellen verminderd worden. Betrouwbaarheid en levensduur moeten aangetoond en verzekerd worden. Jammer genoeg is er een trade-off tussen de verschillende factoren die nog moeten geoptimaliseerd worden. Wanneer men de levensduur wil verlengen is er bijvoorbeeld meer platina nodig, waardoor de kost stijgt. Voor integratie in het voertuig en voor minimalisatie van de kosten, tracht men de grootte en het gewicht van de brandstofcel te verlagen, terwijl men voor een minimaal brandstofverbruik een maximale efficiëntie moet bereiken. Helaas, wanneer men de efficiëntie wil verbeteren, nemen ook de grootte, het gewicht en de kost van het systeem toe. Welke de aandrijftechnologie van de toekomst wordt, is afhankelijk van de evoluties die zullen gebeuren op het vlak van de verschillende technologieën. Wanneer de efficiëntie van batterijen sterk verbetert, zullen elektrische wagens meer succes hebben en de brandstofcelwagens misschien zelfs verdrijven.

De mogelijke milieuvriendelijke alternatieven worden, na een kwalitatieve analyse, ook kwantitatief beoordeeld. De verschillende aandrijfvormen worden bekeken in vergelijking met een Euro 4-benzinevoertuig dat als referentie dienst doet. Elk alternatief wordt beoordeeld op het vlak van zijn kosten en de externe milieukosten die vermeden worden door het alternatief in kwestie te gebruiken in plaats van het benzinevoertuig. Enkel de elektrische wagen en de hybride wagen zijn alternatieven die rendabel zijn ten opzichte van de benzinewagen wanneer er geen rekening

gehouden wordt met belastingen of accijnzen. Hun totale kost, verminderd met de externe milieukosten die vermeden worden door niet de benzinevoertuig te gebruiken, zijn kleiner dan de totale kost voor het benzinevoertuig. Dit geldt zolang de onderhoudskost van de hybride wagen niet veel hoger wordt dan die van de benzinevoertuig. De brandstofcelwagen is het duurste alternatief. Dit is samen met de wagen met een waterstofverbrandingsmotor het enige alternatief dat zelfs niet rendabel wordt wanneer er rekening gehouden wordt met de belastingen en accijnzen op benzine en de belastingsvermindering bij aankoop van een voertuig met een CO₂-uitstoot minder dan 105 g/km respectievelijk tussen 105 en 115 g/km. Alle andere alternatieven, namelijk de wagen op aardgas of LPG en de wagen op biobrandstoffen, zijn dan wel rendabel in vergelijking met de benzinevoertuig. Dat al deze alternatieven dan rendabel worden kan een verantwoording zijn om op deze wagens geen verkeersbelasting en geen accijnzen op de brandstof te heffen. Behalve de subsidie op de aankoop van een wagen met een lage CO₂-emissie zijn er geen andere subsidies nodig. De subsidie op de aankoop van de wagens met een lage CO₂-emissie zou wel beter gedifferentieerd worden, bijvoorbeeld een evenredige toename van de subsidie naargelang de emissie daalt ten opzichte van 105 g/km of op basis van de totale vermeden externe milieukosten. In deze scenario's wordt zelfs de brandstofcel bijna een rendabel alternatief. Een toekomst met waterstof is misschien dus toch niet zo onrealistisch. Zeker de waterstofverbrandingsmotor lijkt veelbelovend, zowel kwantitatief als kwalitatief. Maar ook de brandstofcel zou wel eens niet zo ver gegrepen kunnen zijn.

VOORWOORD

SAMENVATTING

INHOUDSOPGAVE

LIJST VAN DE FIGUREN

LIJST VAN DE TABELLEN

SYMBOLEN- EN AFKORTINGENLIJST

1 INLEIDING EN METHODOLOGISCHE ASPECTEN.....- 16 -

1.1	Inleiding	- 16 -
1.2	Methodologische aspecten.....	- 18 -
1.2.1	Probleemstelling.....	- 18 -
1.2.2	Relevantie van het praktijkprobleem.....	- 18 -
1.2.2.1	Het broeikaseffect en de mogelijke gevolgen.....	- 18 -
1.2.2.2	Tegenstand tegen het Kyoto-protocol.....	- 21 -
1.2.2.3	Het probleem reikt verder.....	- 22 -
1.2.3	Centrale onderzoeksvraag.....	- 23 -
1.2.4	Deelvragen.....	- 26 -
1.2.5	Onderzoekstrategie.....	- 26 -

2 ENERGIEPROBLEMATIEK.....- 28 -

2.1	Energievoorraden.....	- 28 -
2.2	Ecologie.....	- 30 -
2.3	Economie.....	- 34 -
2.3.1	Externe kosten van het personenvervoer.....	- 35 -
2.3.1.1	Marginale externe congestiekosten (MECK).....	- 36 -
2.3.1.2	Marginale externe ongevalkosten.....	- 38 -
2.3.1.3	Marginale externe milieukosten.....	- 41 -
2.3.1.4	Marginale externe kosten van lawaaihinder, plaatsgebruik, geurhinder en lichthinder.....	- 45 -
2.3.2	Internaliseren van de externe kosten.....	- 47 -
2.3.2.1	Evolutie verschillende kostencategorieën en huidig prijsbeleid.....	- 49 -
2.3.2.2	Belastingen.....	- 50 -
2.3.2.3	Subsidies.....	- 51 -

2.3.2.4	Belastingen of subsidies	- 53 -
2.3.2.5	Andere maatregelen	- 55 -

3 HET KYOTO-PROTOCOL- 60 -

3.1	Inhoud van het Protocol	- 60 -
3.2	Flexibiliteitmechanismen	- 65 -
3.2.1	Clean Development Mechanism (CDM)	- 65 -
3.2.2	Joint Implementation (JI)	- 66 -
3.2.3	Emission Trading (ET)	- 67 -
3.2.4	Bubble	- 68 -
3.2.5	Bijkomende aspecten van flexibiliteit in het Kyoto-protocol	- 69 -
3.3	Moeilijkheden in toepassing	- 70 -
3.3.1	Moeilijkheden met internationale milieuproblemen	- 70 -
3.3.2	Moeilijkheden door het tijdsinterval en onzekerheid	- 71 -
3.4	Hoever staat België	- 73 -
3.5	Sancties	- 75 -

4 ALTERNATIEVE AANDRIJFVORMEN- 78 -

4.1	Diesel en benzine	- 78 -
4.2	LPG	- 80 -
4.3	Aardgas	- 82 -
4.4	Waterstof	- 83 -
4.4.1	Productie	- 84 -
4.4.2	Opslag	- 87 -
4.4.3	Distributie	- 90 -
4.4.4	Voor- en nadelen van waterstof en van de waterstofverbrandingsmotor	- 91 -
4.5	Biobrandstoffen	- 95 -
4.6	Andere brandstoffen	- 97 -
4.7	Traditionele aandrijfvormen	- 98 -
4.7.1	Benzinemotor	- 98 -
4.7.2	Dieselmotor	- 99 -
4.8	Alternatieve aandrijfvormen	- 99 -
4.8.1	Elektrische motor met batterij	- 101 -
4.8.2	Hybride voertuigen	- 103 -
4.8.3	Brandstofcellen	- 106 -
4.8.3.1	Werking	- 107 -
4.8.3.2	Reformer	- 108 -

4.8.3.3	Voor- en nadelen	- 111 -
4.8.3.4	Soorten brandstofcellen	- 116 -
4.8.3.5	Balance of plant.....	- 121 -
4.8.3.6	Overzicht van de activiteiten van de belangrijkste autoconstructeurs.....	- 122 -
4.8.3.7	Conclusie	- 125 -
4.8.3.8	Brandstofcel of verbrandingsmotor.....	- 126 -
4.8.4	Conclusie.....	- 127 -
4.8.5	Projecties	- 128 -

5 KOSTEN EN BATEN- 131 -

5.1	Vergelijking tussen verschillende alternatieven	- 131 -
5.1.1	Assumpties.....	- 131 -
5.1.2	Samenvatting van de berekeningen	- 136 -
5.2	Goedkoop is niet noodzakelijk milieuvriendelijk.....	- 142 -
5.3	De belastingvermindering op lage CO ₂ -uitstoot nader bekeken.....	- 143 -
5.4	Introductie alternatieven.....	- 148 -
5.5	Omgekeerde berekening	- 149 -

6 BESLUIT- 151 -

Lijst van de geraadpleegde werken

Bijlagen

LIJST VAN DE FIGUREN

Figuur 1: De broeikasgassen	-17-
Figuur 2: Het broeikas effect	-19-
Figuur 3: Beschouwde categorieën technologieën.....	-25-
Figuur 4: Emissies van schadelijke uitlaatgassen in Vlaanderen door transport	-33-
Figuur 5: Het principe van prijszetting	-35-
Figuur 6: Ecoscore van personenauto's met verschillende brandstof/aandrijflijn en ouderdom, maar met eenzelfde cilinderinhoud.....	-45-
Figuur 7: Gerapporteerde hinder door geluid, geur en licht in Vlaanderen	-47-
Figuur 8: Kloof tussen de huidige belastingen en de marginale externe kosten	-50-
Figuur 9: Evolutie van de CO ₂ -concentratie, temperatuur en zeeniveau	-60-
Figuur 10: Huidige stand van zaken wat betreft opslag	-89-
Figuur 11: Mogelijke bronnen voor waterstofproductie.....	-91-
Figuur 12: Serie hybride aandrijving.....	-104-
Figuur 13: Parallel hybride aandrijving.....	-104-
Figuur 14: Gecombineerde hybride aandrijving	-105-
Figuur 15: Werking van de brandstofcel.....	-107-
Figuur 16: Direct en indirect gebruik van waterstof in een brandstofcelvoertuig	-110-
Figuur 17: Well-to-Wheels-energie en broeikasgasemissies voor verschillende combinaties van productieroutes en aandrijfvormen	-128-
Figuur 18: Besluit	-152-
Figuur A1: Evolutie van het wegverkeer.....	Bijlage 1, p.1
Figuur A2: Evolutie van de emissies van het wegverkeer	Bijlage 2, p.1
Figuur A3: Schematische voorstelling van de route-effect benadering.....	Bijlage 3, p.1
Figuur A5a: Consumentensurplus.....	Bijlage 5, p.1
Figuur A5b: Welvaartsverlies op een vereenvoudigde transportmarkt met congestiekosten en taksen	Bijlage 5, p.2
Figuur A6a: Annex I en Annex II.....	Bijlage 6, p.1
Figuur A7: Duurzame ontwikkeling	Bijlage 7, p.1
Figuur A8a: De kosten	Bijlage 8, p.1
Figuur A8b: De baten	Bijlage 8, p.2

LIJST VAN DE TABELLEN

Tabel 1: Situering van de eindverhandeling	-24-
Tabel 2: Voorraden fossiele brandstoffen	-29-
Tabel 3: Componenten van de uitlaatgassen van een auto	-30-
Tabel 4: De zuivere economische kosten per slachtoffer voor 2004 (in EUR/slachtoffer)	-39-
Tabel 5: Emissienormen voor personenwagens in de verschillende Eurocategorieën	-44-
Tabel 6: Brandstofnorm versus brandstofaksverhoging	-57-
Tabel 7: Verdeling van de emissies in Europa	-64-
Tabel 8: Verschillende scenario's voor CO ₂ stabilisatieniveaus	-72-
Tabel 9: Het batterij-elektrische voertuig tegenover het brandstofcelvoertuig	-116-
Tabel 10: Schematisch overzicht van de verschillende brandstofceltypes	-120-
Tabel 11: Overzicht van de constructeurs	-124-
Tabel 12: Schematisch overzicht van brandstofcel en verbrandingsmotor	-126-
Tabel 13: Projectie van de kosten van verschillende alternatieven	-129-
Tabel 14: Emissiegegevens referentievoertuig	-132-
Tabel 15: Emissiepercentages (uitgedrukt in % ten opzichte van de benzinewagen)	-133-
Tabel 16: Schadefactoren	-133-
Tabel 17: Marginale externe kosten van geluidshinder (EUR/km)	-134-
Tabel 18: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (zonder belastingen)	-137-
Tabel 19: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (met belastingen)	-138-
Tabel 20: Impliciete subsidies op de milieuvriendelijke alternatieven	-140-
Tabel 21: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (referentievoertuig met CO ₂ -uitstoot van 160,2 g/km)	-141-
Tabel 22: Vermeden externe milieukosten	-143-
Tabel 23: Gedifferentieerde belastingvermindering	-144-
Tabel 24: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (inclusief belastingen met gedifferentieerde belastingvermindering)	-145-
Tabel 25: Gedifferentieerde belastingvermindering o.b.v. alle pollutanten (9 EUR/ton CO ₂)	-146-
Tabel 26: Gedifferentieerde belastingvermindering o.b.v. alle pollutanten (20 EUR/ton CO ₂)	-147-
Tabel 27: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (inclusief belastingen met gedifferentieerde belastingvermindering op basis van alle pollutanten)	-147-
Tabel 28: Bespaarde CO ₂ -uitstoot door gebruik alternatieven	-149-
Tabel 29: Schematische weergave van de berekeningen (bedragen in EUR)	-150-
Tabel 30: Overzichtstabel	-153-
Tabel A2: Evolutie van de emissies van het wegverkeer 1990-2030	Bijlage 2, p.1
Tabel A4: Externe milieukost per kilometer in eurocent in functie van de evolutie van het wagenpark	Bijlage 4, p.1
Tabel A6: Annex I, Annex II, Annex B	Bijlage 6, p.2
Tabel A9a: Onderhoudskost benzinewagen	Bijlage 9, p.1
Tabel A9b: Onderhoudskosten verschillende technologieën	Bijlage 9, p.2

SYMBOLLEN- EN AFKORTINGENLIJST

Voorvoegsels

μ	voorvoegsel, micro, 10^{-6}
G	giga, 10^9
k	kilo, voorvoegsel, 10^3 of dus maal 1 000
M	mega, voorvoegsel dat inhoudt dat de waarde ervoor maal 10^6 moet gedaan worden
m	milli, voorvoegsel, 10^{-3} of dus 1 000 keer kleiner
T	tera, voorvoegsel, 10^{12}

Eenheden en afkortingen

°C	graden Celsius, eenheid voor temperatuur. $0\text{ °C} = 273,15\text{ K}$ (Kelvin) 0 K is het absolute nulpunt
bar	eenheid van druk, $1,013\text{ bar} = 1013\text{ hPa}$, of $1,013 * 10^5\text{ Pa}$ (pascal) of 1 atm
dB(A)	akoestische decibel, logaritmische schaal, $1\text{ dB(A)} = 10^{-12}\text{ W/m}^2$, dit is de grens van het menselijk gehoor. $1\text{ W/m}^2 = 120\text{ dB(A)}$
DME	dimethylether
EUR	euro
g	gram
h	uur, $1\text{ h} = 3\,600\text{ s}$
J	joule, eenheid van energie, $1\text{ J} = 1\text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$
K	Kelvin, eenheid voor temperatuur, 0 K is het absolute nulpunt en komt overeen met $-273,15\text{ °C}$
km	kilometer
kW	kilowatt, $1\,000\text{ Watt}$
kWh	kilowattuur: 1 kWh duidt aan dat er elk uur 1 kW verbruikt wordt, $1\text{ kWh} = 3,6 * 10^6\text{ J}$ of $3,6\text{ MJ}$
KWS	koolwaterstoffen
l	liter
lb	pond, $1\text{ kg} = 2,20\text{ lb}$
min	minuten, $1\text{ min} = 60\text{ s}$
NMVOS	Niet-methaan Vluchtige Organische Stoffen
Pa	Pascal, eenheid van druk: $1,013 * 10^5\text{ Pa}$ is gelijk aan een druk van $1,013\text{ bar}$ of 1 atm . $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2 = 1(\text{kg}\cdot\text{m})/(\text{s}^2\cdot\text{m}^2) = 1\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
PAK	PAK's of polycyclische aromatische koolwaterstoffen zijn organische verbindingen die bestaan uit benzeenringen. Ze ontstaan bij onvolledige verbranding of verkooling van diverse koolstof bevattende materialen zoals

	fossiele brandstoffen en voedingsmiddelen. Ze kunnen kankerverwekkende eigenschappen hebben en gevolgen voor het cardiovasculair stelsel.
PM	fijn stof, kleine roetdeeltjes. PM is de afkorting van Particulate Matter en verwijst dus naar stofdeeltjes. PM _{2,5} betekent dan bijvoorbeeld dat de deeltjes kleiner zijn dan 2,5 µm. Bij PM ₁₀ bedraagt de diameter van de stofdeeltjes minder dan 10 µm.
ppm	parts per million: aantal milligram opgeloste stof per liter (of per kilogram) (Franco, 2006)
R&D	Research and Development, of onderzoek en ontwikkeling (O&O)
s	seconden
USD	Amerikaanse dollar
V	volt, eenheid van spanning, $1 V = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/(\text{A}\cdot\text{s}^3)$ met $A = 1$ ampère, eenheid van elektrische stroom
vol%	Een vol% of (massa)volumepercent wordt gedefinieerd als 1 g opgeloste stof, in 100 g oplossing. (Put, 2006)
VOS	Vluchtige Organische Stoffen, dit zijn de NMVOS en methaan
W	Watt, eenheid van vermogen, $1 W = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$

Terminologie

Annex I	De landen die in 1992 tot de OESO (Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling) behoorden en de economieën die zich toen in een overgang bevonden (economies in transition) namelijk de landen van de vroegere Sovjet-Unie en enkele landen in Oost-Europa. Bijlage 6 geeft een schematisch overzicht van deze landen. (CEESE, 2004)
Annex II	De landen die in 1992 tot de OESO behoorden. (CEESE, 2004)
Annex B	Zijn de landen die tot Annex I behoren met enkele aanpassingen. Dit zijn de landen die hun broeikasuitstoot willen verminderen. Annex B geeft hun reductiepercentages waarmee ze hun broeikasgasuitstoot willen verminderen. De landen op de Annex B-lijst van het Kyoto-protocol verschilt van de Annex I-lijst wat betreft de volgende landen: Kroatië, Liechtenstein, Monaco, Tsjechië, Slowakije en Slovenië. Turkije en Wit-Rusland zijn niet in de Annex B opgenomen. (CEESE, 2004) Bijlage 6 geeft een schematisch overzicht.
Commitment	Deze term houdt in dat de partijen steeds een bepaalde reserve aan
Period Reserve (CPR)	emissierechten moeten overhouden
Conventie	UNFCCC: United Nations Framework Convention in Climate Change (raamverdrag van de Verenigde Naties inzake klimaatverandering), opgericht in New York op 9 mei 1992
Hot Air	Deze term verwijst naar het risico dat landen die hun broeikasgasverplichtingen met een minimum aan inspanningen kunnen

	<p>nakomen de markt kunnen overspoelen met Emissierechten of Hot Air. Hierdoor gaan andere landen minder inspanningen doen om in hun land de broeikasgassen te doen dalen. In het rapport van CEESE (2004) staat te lezen dat bijvoorbeeld Rusland en Oekraïne ongeveer 25 % tot 30 % onder het uitstootniveau van 1990 zitten. Hierdoor bestaat het gevaar dat ze het verschil tussen hun quota en verwachte uitstoot gaan verkopen aan andere landen, waardoor er een fictieve emissiehandel ontstaat. In dat geval kan er een globale stijging van broeikasgasemissies plaatsvinden.</p>
MECK	<p>Marginale externe congestiekosten. Deze kosten ontstaan doordat een bijkomende weggebruiker de tijdskosten en de materiële kosten voor de andere weggebruikers doet stijgen</p>
MOP/COP	<p>Meeting of Parties of Conference of the Parties (COP) van de UNFCCC. De COP is het hoogste orgaan van de Conventie. Het woord Conferentie slaat op een vereniging, niet op een bijeenkomst. COP-3 betekent dan de derde bijeenkomst van de Conferentie van de partijen van de UNFCCC. (CEESE: 2004)</p>
niet-Annex I	<p>De landen die geen quota opgelegd kregen voor de uitstoot van hun broeikasgassen, zijn niet-Annex I-landen.</p>
Peak oil	<p>Dit is het moment waarop het olieaanbod de vraag niet meer kan volgen.</p>
Tank-to-Wheels	<p>Deze evaluatie brengt de energie die gebruikt wordt en de broeikasgasemissies die uitgestoten worden door de verschillende voertuig/brandstof combinaties in rekening. Ook de verwachte relatieve verkoopprijzen van de verschillende voertuigcombinaties worden beschouwd. (CONCAWE, EUCAR en JRS, 2004)</p>
Well-to-Tank	<p>Deze evaluatie brengt de energie die gebruikt wordt en de broeikasgasemissies die uitgestoten worden in alle stappen die nodig zijn om de afgewerkte brandstof aan boord van het voertuig te brengen in rekening. Ook de potentiële beschikbaarheid van de brandstoffen wordt hierbij niet vergeten en de kosten die hiermee geassocieerd zijn. (CONCAWE, EUCAR en JRS, 2004)</p>
Well-to-Wheels	<p>Deze evaluatie geeft een globale meting van de vereiste energie en de uitgestoten broeikasgasemissies per gereden kilometer voor elke brandstof/voertuig combinatie. (CONCAWE, EUCAR en JRS, 2004)</p>
ZEV	<p>Zero Emission Vehicle: dit is een voertuig dat geen schadelijke stoffen uitstoot (EC JRC-IPTS en ESTO, 2003)</p>

1 INLEIDING EN METHODOLOGISCHE ASPECTEN

**“De natuur bedriegt ons nooit;
het zijn altijd wij die onszelf bedriegen.”
(Rousseau, geciteerd door Van Dooren, 1996: 5)**

1.1 Inleiding

De huidige maatschappij wordt geconfronteerd met een energieproblematiek die twee belangrijke oorzaken kent. Enerzijds verlopen de energiebehoeften in stijgende lijn. Dit veroorzaakt een probleem aangezien fossiele brandstoffen uitputbaar zijn. Anderzijds heeft België het Kyoto-protocol ondertekend, waardoor ons land ervoor moet zorgen dat de emissies van broeikasgassen sterk verminderd worden.

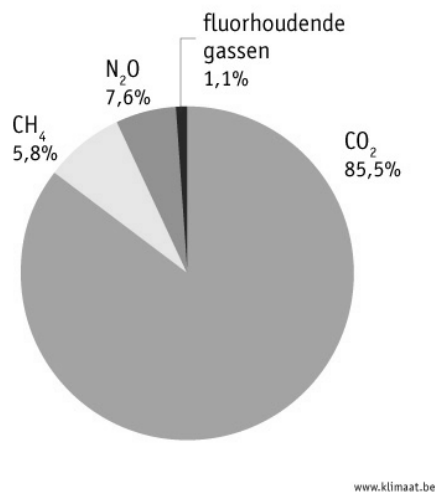
Twee oorzaken liggen aan de basis van de toenemende energiebehoeften, namelijk de toename van de bevolking en het stijgend Bruto Nationaal Product. De wereldbevolking neemt ongeveer met 0,9 % per jaar toe en zou zo acht miljard bedragen in 2030. Ten gevolge van een geschatte stijging van 2,7 % per jaar verwacht men dat het Bruto Nationaal Product zou verdubbelen tegen 2030. (ExxonMobil Corporate Citizenship, 2005) Om een economische groei en een stijgende welvaart te bewerkstelligen is er voldoende energie nodig. Bijgevolg brengt een stijgend Bruto Nationaal Product een verhoging in de energiebehoefte met zich mee. Dit is echter niet het geval wanneer Rationeel Energiegebruik¹ (REG) toegepast wordt. Hierdoor wordt economische groei op lange termijn mogelijk, rekening houdend met de draagkracht van het milieu en de eindigheid van de fossiele brandstoffen. Door de in deze alinea toegelichte oorzaken zal de wereldwijde vraag naar energie met ongeveer 1,7 % per jaar toenemen. Zo wordt voorspeld dat er in het jaar 2030 60 % meer energie nodig zal zijn dan in 2004 wanneer het huidige beleid wordt voortgezet, meldt het International Energy Agency (2004).

Het IEA (2004) vermeldt in haar rapport dat, hoewel de fossiele brandstoffen slechts beperkt voorradig zijn, de totale uitputting nog relatief ver verwijderd is. Dus hoewel er in theorie wel voldaan kan worden aan de stijgende energiebehoeften met de resterende fossiele reserves, of toch zeker tot 2030, is de vraag aan welke kost dit kan gebeuren. Want enkel de moeilijk ontginbare bronnen blijven nog over. Dit wordt ook door het volgende citaat bijgetreden: *“The stone age did not end for a lack of stones, and the oil age will end long before the world runs out of oil.”* (The Economist, geciteerd door Van Mierlo en Macharis, 2006: 31) *[Het Stenen tijdperk werd niet beëindigd door een gebrek aan stenen, en het olietijdperk zal worden beëindigd lang voordat*

¹ Emis (2006) definieert Rationeel Energiegebruik als een onderdeel van een beleid van duurzame ontwikkeling. REG tracht duurzame ontwikkeling te bereiken door enerzijds minder energie te gebruiken en anderzijds door over te schakelen op hernieuwbare energiebronnen.

de olie op raakt.] Bovendien moet er ook op langere termijn gekeken worden, dus naar de periode na het jaar 2030. Ook dan zal de wereld nog energie nodig hebben. Dat is een van de redenen waarom dit het onderwerp van deze eindverhandeling uitmaakt. Ook al zijn er deze eeuw nog voldoende fossiele brandstoffen ter beschikking, toch moet er onderzoek gedaan worden naar nieuwe energiebronnen om aan de energiebehoeftes van toekomstige generaties te kunnen voldoen, wat transgenerationale solidariteit genoemd kan worden. De genoemde nieuwe energiebronnen kunnen zowel efficiëntieverbeteringen bij het gebruik van bestaande bronnen als het toepassen van milieuvriendelijke, alternatieve brandstofvormen zijn.

Het Kyoto-protocol heeft tot doel de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. De zes broeikasgassen – getoond in figuur 1 – die zullen moeten gereduceerd worden zijn CO₂ (koolstofdioxide), één van de belangrijkste broeikasgassen wegens de lange verblijftijd in de atmosfeer, N₂O (beter bekend als lachgas), CH₄ of methaan en fluorverbindingen, namelijk PFK's, HFK's en SF₆ (Energieraad Nederland, 2006). België heeft zich ertoe verbonden om in de periode 2008 tot 2012 zijn emissies met 7,5 % te verminderen ten opzichte van 1990. Het Protocol wordt verder in deze eindverhandeling uitgebreid besproken. In figuur 1 worden de relatieve bijdragen van de verschillende broeikasgassen aan het broeikas effect getoond. CO₂ wordt duidelijk het meest uitgestoten.



Figuur 1: De broeikasgassen (Klimaat.be, 2006)

1.2 Methodologische aspecten

1.2.1 Probleemstelling

Door het Kyoto-protocol te ondertekenen heeft België de taak op zich genomen om de uitstoot van broeikasgassen in de periode 2008 tot 2012 te verminderen met 7,5 % tegenover het emissieniveau van 1990. Door de huidige technologie te gebruiken kan het huidige niveau echter niet significant verlaagd worden. Bovendien verwacht men, zoals eerder vermeld, dat de energiebehoefte nog zal blijven stijgen zodat er een kloof ontstaat tussen vraag en aanbod, wat stijgende energieprijzen met zich meebrengt. De verlaging van de broeikasgassen zal op verschillende terreinen moeten gebeuren. Zowel de industrie, de bouwsector, de gezinnen als de transportsector zullen hun steentje moeten bijdragen.

1.2.2 Relevantie van het praktijkprobleem

In dit onderdeel zal worden aangetoond waarom het gekozen onderwerp zo belangrijk is. Enerzijds wordt het belang van de broeikasgassen besproken en anderzijds wordt verklaard waarom voertuigen de aandacht verdienen, waarbij in het bijzonder personenvervoer via auto's behandeld wordt.

1.2.2.1 Het broeikaseffect en de mogelijke gevolgen

Het grootste deel van de straling van de zon wordt door de verschillende lagen in de atmosfeer teruggekaatst. Warmte-energie, een onderdeel van de zonnestraling, blijft dan ook deels in de atmosfeer hangen, terwijl een ander deel wordt geabsorbeerd door het aardoppervlak, om vervolgens weer teruggekaatst te worden. Ook van die terug uitgestraalde warmte blijft er een deel in de atmosfeer hangen. Warmte wordt dus aan het aardoppervlak vastgehouden door de atmosfeer, waardoor het leven op aarde in stand kan worden gehouden. Het gas dat het meest verantwoordelijk is voor het vasthouden van warmte door de atmosfeer is koolstofdioxide. Zoals Dassen (1990) schrijft, werkt het gas als een soort glasplaat, wat ook de naam broeikaseffect verklaart. Het natuurlijke broeikaseffect is bijgevolg noodzakelijk, zonder de atmosfeer zou de temperatuur op aarde gemiddeld slechts -18 °C bedragen, tegenover de huidige 15 °C. (Emis, 2006) In figuur 2 op de volgende pagina kan een schematische voorstelling van het broeikaseffect worden teruggevonden.



Figuur 2: Het broeikaseffect (Emis, 2006)

Ongeveer 95 % van de CO₂-uitstoot is afkomstig van de natuur zelf. Slechts 5 % van de broeikasgassen komt door toedoen van de mens in de atmosfeer terecht. (Martens, 2006) Toch heeft die 5 % een significante invloed. Volgens Aminal (2007) zorgt de natuur zelf voor een uitstoot van 755 Gton CO₂/jaar. Vermits de aarde 770 Gton CO₂/jaar kan afbreken, blijft er een reserve van 15 Gton/jaar over. Maar omdat de mens ongeveer 30 Gton/jaar uitstoot, komt er 15 Gton CO₂/jaar teveel in de atmosfeer terecht. Door de menselijke CO₂-emissies, wordt het natuurlijke broeikaseffect behoorlijk versterkt. De meest directe gevolgen van die gassen in de atmosfeer hebben te maken met wijzigingen in de temperatuur. Er wordt wereldwijd een temperatuurstijging van 1,4 tot 5,8 K verwacht. (Rifkin, 2002; UCL en Greenpeace, 2004) Hens (2006) verwacht voor België een temperatuurstijging van 1,7 tot 4,9 K in de winter en zelfs 2,4 tot 6,6 K in de zomer aan het einde van de éérentwintigste eeuw. De verschillende voorspellingen van de temperatuur lopen een beetje uiteen naargelang het gebruikte model, maar deze cijfers worden door meerdere auteurs vermeld. (UCL en Greenpeace, 2004; Thulkens en Thulkens, 2006) Op zich is de huidige klimaatverandering eerder neutraal, de natuur evolueert naar een nieuw evenwicht. Dit evenwicht moet echter wetenschappelijk beoordeeld worden. Mensen hebben zich geschikt naar het huidige evenwicht. Er zijn zowel voor- als tegenstanders om in te grijpen in de klimaatveranderingen zoals hieronder wordt weergegeven. De neerslagpatronen, die veranderen onder invloed van de temperatuur, kunnen dramatisch zijn wanneer ze overstromingen veroorzaken of tropische windhozen verergeren. Nieuwe milieumomstandigheden kunnen door deze beide oorzaken ontstaan. Deze beïnvloeden niet alleen de natuur en het zeeniveau, maar ook de landbouw. Hierdoor wordt er ook een effect uitgeoefend op het inkomen van de boeren en dus op de lokale en regionale economie. De uitstoot van broeikasgassen brengt dus een hele reeks opeenvolgende effecten met zich mee, waarvan de impact moeilijk te voorspellen of te meten is.

Velen hebben een invloed op de menselijke gezondheid. Bovendien is de invloed van een klimaatsverandering mondiaal en werken de gevolgen op zeer lange termijn (VUB, VITO en CEESE, 2005). Hier kan de transgenerationale solidariteit aangehaald worden. Er kan gediscussieerd worden of het niet onethisch is om enkel aan onszelf te denken en niet aan toekomstige generaties en minder ontwikkelde landen terwijl de klimaatverandering ook voor hen gevolgen heeft. Volgens Mc Michael et al. (1996) geciteerd door Hens (2006) kunnen de gevolgen onderverdeeld worden in vijf verschillende groepen.

a) Gezondheid:

Allereerst veroorzaken hittegolven in de zomer oversterfte en meer kanker, hogere ozonconcentraties die luchtverontreiniging met zich meebrengen en een toename van actoren die tot allergische reacties leiden. De warmere winters kunnen dit niet compenseren. Een hogere temperatuur gaat bovendien gepaard met een lagere luchtvochtigheid, wat een effect heeft op het functioneren van de longen. Om zich te beschermen tegen hittegolven gebruiken mensen vaak airconditioning- of ventilatiesystemen, die energie verbruiken en bijgevolg bijdragen aan het uitstoten van CO₂!

b) Biodiversiteit:

De spreiding van planten en dieren wordt beïnvloed en ook die van organismen die ziektes veroorzaken. Door de verspreiding van malaria bijvoorbeeld, zal het malariagebied vergroten. De bevolking die in gebieden leeft die door deze ziekte getroffen worden, zal tegen 2100 aanzienlijk toenemen. Ook Rifkin (2002) noemt dit een gevaar van de opwarming van de aarde.

c) Klimaat, landbouw:

Ook de mogelijke impact van klimaatwijzigingen op de landbouw, zoals potentieel productiviteitsverlies, is een gevolg van de klimaatveranderingen. Dit draagt bij tot een grotere voedselonzekerheid. Watermassa's zullen eveneens te lijden hebben onder een dalende productiviteit door temperatuursveranderingen in zeestromen, voedselstromen en winden. Niet alleen voor de mens, maar ook voor de wezens die in de oceanen leven, vormt dit problemen. Daems (2006) beschrijft bijvoorbeeld het volgende probleem: doordat de piek van de planktonbloei niet langer gelijk loopt met het larvestadium van de vissen, worden er minder vissen volwassen. Hierdoor is er tevens minder voedsel hogerop in de voedselketen, bij vissoorten, vogels en zelfs zoogdieren zoals de bruinvis. Dit voorbeeld toont mooi het keteneffect van de klimaatveranderingen tengevolge van het broeikas effect aan. Gelijkaardige voorbeelden zijn er natuurlijk ook op het vasteland te vinden, bijvoorbeeld doordat de lente in onze streken steeds vroeger haar intrede doet. Bovendien ondervindt niet alleen de dieren- maar ook de plantenwereld de effecten van de

opwarming. Nieuwe exotische dieren- en plantensoorten verdringen de bestaande fauna en flora.

d) Natuurrampen:

Een vierde effect volgt uit de toename van windhozen. Die zullen niet alleen meer doden, gewonden of hongerigen met zich meebrengen, maar ook een impact hebben op de psychische gezondheid en sociaal afwijkend gedrag.

e) Zeespiegel:

De stijging van het zeeniveau is het laatste effect. Dit kan migratie, verlies aan landbouwgronden, verzilting van het drinkwater en sociale moeilijkheden veroorzaken. Stormschade kan gevolgen hebben voor de gezondheid doordat bijvoorbeeld de sanitaire en verkeersinfrastructuur in kustgebieden waarschijnlijk beschadigd worden. (Mc Michael et al., 1996, geciteerd door Hens, 2006) Deze stijging van het zeepeil heeft een tweeledige oorzaak volgens Rifkin (2002). Allereerst zal het zeepeil stijgen door het afsmelten van de ijskappen, maar ook de thermische expansie van het water van de oceanen door de opwarming van de aarde ligt aan de basis van het stijgende zeepeil dat een bedreiging vormt voor de helft van de wereldbevolking, die in kustgebieden woont.

Er wordt niet getracht om een exhaustief overzicht te geven van de gevolgen van een klimaatverandering. Het is veeleer de bedoeling aan te geven hoe ver de gevolgen van de opwarming van de aarde kunnen gaan.

1.2.2.2 Tegenstand tegen het Kyoto-protocol

Het zou te eenzijdig zijn om enkel de onderzoekers te beschouwen die achter het Kyoto-protocol staan. Daarom worden ook enkele klanken van protest weergegeven die ingaan tegen de pogingen om broeikasgasemissies te beperken. Het groepje tegenstanders, dat het niet eens is met de opwarming van de aarde, vindt echter steeds minder navolging. Eén van de dissidenten is Kroonenberg, die het Kyoto-protocol geldverspilling vindt, een andere de Deense statisticus Lomborg. Kroonenberg beweert dat de klimaatsystemen zo complex zijn dat de mens daar geen grote invloed op kan hebben. En zelfs als de mens er invloed op zou hebben, zou er toch niets aan kunnen veranderd worden. De natuur denkt in veel grotere cycli dan de mens, die enkel op te korte termijn kijkt. Bovendien noemt hij het hele Kyoto-protocol te politiek getint. Beleidsmakers willen duidelijke antwoorden van de wetenschappers in hun rapporten terwijl die er niet zijn. (Kroonenberg, geciteerd door Knack, 2006) Kroonenberg (Knack, 2006) herhaalt ook wat Van Dooren (1996) al schreef: in de jaren zeventig maakten klimatologen zich geen zorgen over een "global warming", maar over een "global cooling". De temperaturen van de jaren dertig tot

zeventig vertonen immers een dalende trend. Men vreesde voor een neerwaartse temperatuurspiraal, die zou leiden tot een echte ijstijd. Ook wanneer de temperaturen vanaf 1880 tot 1970 werden bekeken, kon die afkoeling worden afgeleid. Nu, een aantal decennia later, vrezen klimatologen om in een opwaartse spiraal van stijgende temperaturen beland te zijn. Ook dit kan ernstige gevolgen hebben. Maar het is moeilijk te voorspellen wat er gaat gebeuren. De best mogelijke voorspellingen zijn daarom nog geen goede. Misschien, zegt Van Dooren (1996), moeten de wetenschappers hun modellen om de voorspellingen te maken nog verder verfijnen.

Een ander idee dan dat de cycli van de aarde groter zouden zijn dan de cycli waarin de mens denkt, is het idee van Gaia, een levende planeet, dat door Lovelock werd aangebracht (Van Dooren, 1996). Dergelijke werelden vinden zelf een optimum waarmee alle soorten kunnen leven. Ze herstellen zich zelfs nog van meteorietinslagen die veertig percent van alle leven doden. Het leven houdt zichzelf in stand en zorgt voor optimale omstandigheden, maar het optimum en de levensvormen moeten niet noodzakelijk hetzelfde blijven. In deze theorie overleeft de aarde de enorme toename van CO₂-emissies wel en is er een goede kans dat er een nieuwe biosfeer ontstaat, maar daarin is niet noodzakelijk nog plaats voor de mens. Dergelijke theorieën moeten natuurlijk ook kritisch bekeken worden. Er zijn al verschillende levende wezens uitgestorven.

De beoordeling van de klimaatproblematiek kan vanuit verschillende invalshoeken gebeuren. Een wiskundige en een wetenschappelijke beoordeling zijn mogelijk, maar vaak gebeurt de beoordeling via een normatieve aanpak: er wordt gekeken naar wat er gewenst is. Deze aanpak is echter subjectief. Sommigen argumenteren bijvoorbeeld dat voor België een opwarming niet slecht zou zijn, de Belgen zouden volgens hen dan beter af zijn. Maar er heerst toch een algemeen aanvaarde solidariteit die een dergelijke houding onaanvaardbaar maakt. In de algemeen aanvaarde solidariteitshouding wordt er ook rekening gehouden met plaatsen buiten België en met generaties na de huidige generatie.

1.2.2.3 Het probleem reikt verder

Zelfs als de aarde zich zou herstellen van onze steeds stijgende CO₂-emissies of als er gewoon in grotere cycli zou moeten gedacht worden, zijn er nog andere redenen tot bezorgdheid. Die worden al aangegeven door de stijgende brandstofprijzen, die tegenwoordig, en zelfs al enkele jaren, vaak in de media aangehaald worden. De wereld zal steeds meer afhankelijk worden van de landen met oliereserves, die vaak politiek instabiel zijn. Bovendien zijn er enorme investeringen in nieuwe infrastructuur nodig als de moeilijker ontginbare reserves willen aangesproken worden. Het International Energy Agency (2004) vermeldt investeringen van 16 TUSD van 2003 tot 2030, of omgerekend 568 GUSD per jaar. Dit komt ongeveer overeen met anderhalf keer het BBP van België. De armere delen van de wereld zouden dan nog geen toegang hebben tot moderne

energievoorzieningen. Zij zouden ongeveer de helft van die investering nodig hebben, maar hebben daar het kapitaal niet voor. En zoals in de bovenstaande alinea al eerder vermeld werd, zou er in ieder geval naar hernieuwbare bronnen, zoals de zon, wind en water moeten gekeken worden en ook naar efficiëntieverbeteringen van de huidige technologieën om op langere termijn toekomstige generaties van energie te kunnen voorzien. Daarom handelt deze eindverhandeling ook over welke alternatieve aandrijfvormen voor auto's gebruikt kunnen worden.

Mobiliteit wordt door Van Mierlo en Macharis (2006) de motor van de samenleving genoemd omdat het een noodzaak of een voorwaarde is voor economische groei en welvaarts- (of welzijns-) ontwikkeling. Ook op het niveau van het individu is mobiliteit belangrijk om volwaardig aan het maatschappelijke leven te kunnen deelnemen en om het intellect te verbreden. Een persoon geeft gemiddeld 10 % tot 15 % van zijn inkomen – dat in 2004 in Vlaanderen gemiddeld 13 485 EUR bedraagt (Federale Overheidsdienst Economie, 2007) – uit aan verplaatsingen, waarvan 80 % met de auto gebeuren. Het voorgaande toont het belang aan van mobiliteit in het algemeen en van de auto in het bijzonder. Sauviller (2006) vermeldt dat het exploderende wegtransport, waarvan de evolutie tussen 1990 en 2030 in bijlage 1 wordt getoond, zelfs de hoofdreden is voor de toename van de uitstoot van broeikasgassen in België. De transportsector zou volgens Van Herbruggen en Proost (2002) tegen 2010 verantwoordelijk zijn voor 21,3 % van de CO₂-emissies in Vlaanderen. Nu neemt de transportsector volgens Van Mierlo et al. (2006) ongeveer 19 % van de CO₂-emissies in Vlaanderen voor zijn rekening. Er wordt verwacht dat de CO₂-uitstoot gerelateerd aan het brandstofverbruik elk jaar met ongeveer anderhalve percent zal stijgen. In dat geval zal het aandeel van de uitstoot door de transportsector nog groter zijn dan 21,3 % in 2010. Dit is te wijten aan het feit dat de toenemende mobiliteit slechts gedeeltelijk zal gecompenseerd worden door een verbeterde energie-efficiëntie van de voertuigen. Ook de bijdrage van transport aan de uitstoot van ander schadelijke emissies is aanzienlijk, zoals in hoofdstuk 2 verduidelijkt wordt.

1.2.3 Centrale onderzoeksvraag

Nu het probleem uiteen gezet is, kan een centrale onderzoeksvraag afgeleid worden. In deze eindverhandeling is de centrale onderzoeksvraag **“Hoe kan op een economisch verantwoorde manier in België duurzame mobiliteit bewerkstelligd worden in het personenvervoer?”** Onder duurzame mobiliteit wordt hetzelfde begrepen als bij Van Mierlo en Macharis (2006: 29), namelijk “een vorm van mobiliteit die geen gevaar vormt voor de volksgezondheid of voor de ecosystemen en toch voldoet aan de vraag naar bereikbaarheid maar op een zodanige manier dat het verbruik van hernieuwbare energiebronnen kleiner is dan de regeneratiesnelheid ervan en het verbruik aan uitputbare energiebronnen trager verloopt dan de ontwikkeling van hernieuwbare substituten.” Dit is een zeer breed probleem. In deze paragraaf wordt het onderwerp van de eindverhandeling bijgevolg verder gesitueerd en afgebakend. Om tot een maatschappelijk optimale

mobiliteit te komen, kunnen verschillende strategieën gevolgd worden. Nieuwe technologieën en alternatieven kunnen aangewend worden, zowel voor het vrachtvervoer, als voor het personenvervoer. In tabel 1 worden enkele mogelijkheden schematisch weergegeven.

Er wordt getracht een antwoord te verschaffen op de centrale onderzoeksvraag vanuit de optiek van het personenvervoer. Het vrachtvervoer wordt niet behandeld. Wat betreft het personenvervoer wordt het onderwerp van deze eindverhandeling verder afgebakend tot de in het schema *schuin gedrukte* onderwerpen, namelijk alternatieve aandrijftechnologieën voor auto's.

Tabel 1: Situering van de eindverhandeling

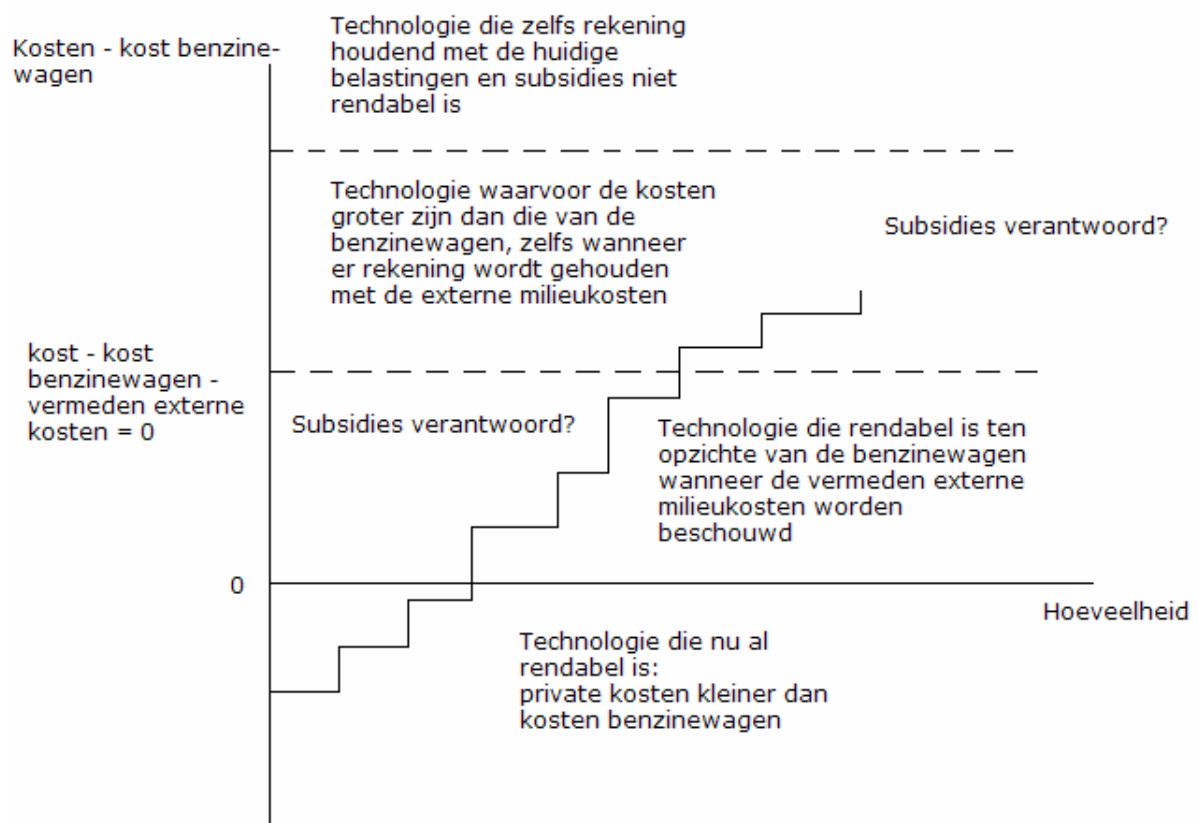
Methoden om tot duurzamer vervoer te komen

Vrachtvervoer:		Personenvervoer:	
A	1 Motoren	A	<i>Benzine</i>
	2 Spoor		<i>Diesel</i>
	3 Binnenvaart		<i>LPG</i>
B	Decentrale productie		<i>Aardgas</i>
			<i>Waterstof</i>
			<i>Biobrandstoffen</i>
			<i>Elektrisch</i>
			<i>Hybride</i>
			<i>Brandstofcel</i>
			Luchtdruk
		B	Fiets
		C	Openbaar Vervoer
		D	Minder verplaatsing door: Thuiswerk, video- conferencing, dichtbij werk wonen,...
		E	Mentaliteitsverandering (bijvoorbeeld in vrije tijd minder reizen, want dat is zeer vervuilend of producten uit België kopen in plaats van uit verre landen)

Er zijn verschillende redenen om alternatieve vormen van vervoer te bekijken. Deze worden kort aangehaald en uitgebreider behandeld in de hoofdstukken 2, 3 en 4. Redenen om nieuwe technologieën en alternatieven te ontwikkelen zijn de vermeden externe kosten van congestie, ongevallen, vervuiling en geluid. Ook een vermindering van de CO₂-uitstoot en het Kyoto-protocol zijn redenen om alternatieven te gebruiken. Externe kosten worden uitgebreid besproken in hoofdstuk 2. Het Kyoto-protocol komt aan bod in hoofdstuk 3. Bovendien wordt een technologie goedkoper wanneer hij gebruikt wordt en kan er dus ook rekening gehouden worden met de toekomst, waarin de prijzen van de alternatieven zullen dalen door ze nu reeds te gebruiken. De transgenerationele solidariteit geeft een bijkomende reden om nieuwe technologieën en alternatieven te gebruiken. Daarenboven zorgen een technisch en een sociaal-economisch

multiplicatoreffect voor voordelen op andere gebieden. Deze redenen worden behandeld in paragraaf 4.8.

Sommige nieuwe technologieën zijn nu al rendabel, andere zijn niet rendabel wanneer ze zuiver economisch bekeken worden, maar zorgen wel voor een daling van de externe kosten wanneer ze een deel van de conventionele technologieën vervangen. Voor dergelijke technologieën kan het verantwoord zijn om subsidies te geven omdat de maatschappelijke kost kleiner wordt dan wanneer benzine gebruikt wordt. Op die manier kan het publiek er toe aangezet worden deze alternatieve technologieën in gebruik te nemen. Voor nog andere technologieën is de kost nog groter dan de kost van benzine en de vermeden externe kosten. Er kan dan betwist worden of het nog verantwoord is om dergelijke technologieën te subsidiëren. Andere redenen in de bovenstaande alinea kunnen de subsidies misschien toch nog rechtvaardigen. Het onderzoek welke technologieën in welke categorie horen, maakt eveneens deel uit van deze eindverhandeling. De vier categorieën technologieën die in dit werk beschouwd worden, zijn in de volgende figuur weergegeven.



Figuur 3: Beschouwde categorieën technologieën

1.2.4 Deelvragen

In deze eindverhandeling worden verschillende deelvragen bekeken.

- In welke mate zijn er nog voldoende fossiele brandstoffen om aan de stijgende energiebehoeften te voorzien?
- Wat is de ecologische impact van voertuigen, en in het bijzonder van personenwagens?
- Wat is de evolutie van de emissies van personenwagens?
- Wat zijn de externe kosten van het personenvervoer en hoe evolueren ze?
- Wat zijn de huidige emissienormen?
- Hoe goed internaliseert de huidige prijszetting de externe kosten?
- Welke maatregelen zijn er mogelijk om de broeikasgasemissies van het personenvervoer te verminderen?
- Wat houdt het Kyoto-protocol in en hoe gaat het in zijn werk?
- Welke zijn de milieuvriendelijkste alternatieve aandrijfvormen of brandstoffen?
- Waarom wordt er zo vaak over waterstof gesproken?
- Zal de waterstofverbrandingsmotor of de brandstofcel op lange termijn aan onze vervoersbehoeftes voldoen?
- Wat is de huidige stand van zaken op het gebied van waterstofproductie, opslag en distributie?
- Waar zijn de autoconstructeurs mee bezig op het gebied van waterstof?
- Welke alternatieve technologie biedt het meeste mogelijkheden?
- Wat is de kloof tussen de kost van de alternatieven exclusief en inclusief belastingen en accijnzen op benzine en subsidies op milieuvriendelijke alternatieven?
- Voor welke technologieën zijn subsidies verantwoord?
- Wat is de huidige impliciete subsidie die door de overheid gegeven wordt aan de alternatieven door de hoge belastingen op benzine en de belastingvermindering op aankoop van een technologie met een lage CO₂-uitstoot?
- Welke technologieën zijn rendabel ten opzichte van het benzinereferentievoertuig?

1.2.5 Onderzoekstrategie

Om het Kyoto-protocol en de verschillende aspecten van de energieproblematiek en de verscheidene aandrijfvormen en brandstoffen zo correct mogelijk te bespreken werd een grondige literatuurstudie verricht. De verschillende relevante bronnen kunnen teruggevonden worden in de tekst en in de literatuurlijst. Er werd getracht de recentste informatie toe te voegen in alle hoofdstukken waardoor het internet ook vaak geraadpleegd werd. De meest relevante websites werden overlopen. Ook deze kunnen in de literatuurlijst worden teruggevonden. Er werd getracht recente kosteninformatie in verband met waterstof en de gebruikte technologieën te verkrijgen van de verschillende autoconstructeurs, maar deze is jammer genoeg niet beschikbaar voor het publiek. Via de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) werden verschillende

relevante publicaties verkregen. De databanken van de Universiteit Hasselt werden eveneens geraadpleegd om relevante publicaties te vinden.

Om meer inzicht te krijgen in de milieu- en vervoersmaterie werden twee beurzen en een congres bezocht. Ifest in Gent en het Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres in Brussel dat in 2006 handelde over mobiliteit en grootstedenbeleid mochten zeker niet op de lijst ontbreken. Ook de derde editie van de Ecomobielbeurs in Antwerpen werd bezocht. Bovendien werden er twee interviews afgenomen met Prof. Ir. Pecqueur van de Karel de Grote-Hogeschool waar getracht wordt een waterstofverbrandingsmotor te ontwikkelen en bussen volledig op waterstof te laten rijden. Bovendien maakt Prof. Ir. Pecqueur deel uit van de raad van bestuur van de firma Hydrothane. Ook werd een interview georganiseerd met de Heer Heremans, een Volvo-verdeler, om meer inzicht te krijgen in de onderhoudskosten voor de verschillende technologieën.

2 ENERGIEPROBLEMATIEK

“In onze huidige wereld worden ongeveer 90 M vaten olie/dag geconsumeerd. Vermits één vat olie 159 l bevat, consumeren we met ons allen dus elke dag 14,31 GJ. Hiervan verbruikt de gemiddelde Amerikaan gemiddeld 21 l/dag, de gemiddelde Europeaan 11 l en in Ethiopië bedraagt de gemiddelde olieconsumptie per dag per persoon ongeveer 0,01 l terwijl een Chinees 0,4 l/dag verbruikt.” (Pecqueur, 2007a)

2.1 Energievoorraden

Het energieprobleem is eigenlijk drieledig. Allereerst is er de confrontatie met de eindigheid van de energievoorraden. Verder spelen ook ecologie (paragraaf 2.2) en economie (paragraaf 2.3) een rol. Er zijn nog maar genoeg fossiele brandstoffen voorhanden voor enkele tientallen jaren, zoals wordt getoond in tabel 2 op de volgende bladzijde. Bovendien is er een politieke en economische afhankelijkheid van een beperkt aantal olieproducerende landen. Van Mierlo et al. (2006) melden dat de energieafhankelijkheid van de Europese Unie van externe energiebronnen weliswaar teruggelopen is van 40 % in 1990 tot 35 % in 2000, binnen 20 à 30 jaar kan deze afhankelijkheid gemiddeld 60 % bedragen. Zonder bijzondere maatregelen zal de prijs van de olie blijven stijgen. Dan worden milieuvriendelijke alternatieven interessanter. Op een bepaald ogenblik zal er een moment komen waarop het aanbod van olie de vraag niet meer kan volgen. Dit noemt men “peak oil”. Dan komen er heel hoge olieprijsen tot stand. Dit ogenblik is niet precies bepaald in de tijd omdat er wat speling opzit doordat de OPEC-landen af en toe de kraan weer wat meer toedraaien. (Van Mierlo, 2006; Energiesparen.be, 2006) Dit is wel een argument om nu al met het ontwikkelen van alternatieve aandrijfvormen te beginnen, want anders is het misschien te laat.

De bewezen reserves voor aardolie, aardgas en steenkool worden weergegeven in tabel 2. In deze tabel worden de verhoudingen van de bewezen reserves – dit zijn de momenteel gekende reserves die bij de huidige economische omstandigheden uitbaatbaar zijn – ten opzichte van productie weergegeven voor eind 2005. Dit betekent dat er bijvoorbeeld met de bewezen reserves voor olie nog 40 jaar toegekomen kan worden aan het productietempo van 2005. Deze gegevens moeten nog genuanceerd worden. In de toekomst zullen er nog meer reserves uitbaatbaar worden door technologische vooruitgang en stijgende energieprijzen. Ook zijn er nog onontdekte reserves waarvan men kan verwachten op basis van statistische analyse dat ze nog ontdekt en uitgebaat zullen worden. Dit totaal wordt in de internationale statistieken de resources of voorraden genoemd². Uiteindelijk zal de olie- en gasproductie echter niet dalen door een totale uitputting van de voorraden. De productie zal waarschijnlijk eerder inkrimpen doordat andere alternatieve

² Volgens Rifkin (2002) zullen er in de toekomst geen reusachtige olievelden meer ontdekt worden. Er zullen nog wel kleinere velden gevonden worden, maar deze zullen de constante daling van de voorraden niet kunnen tegenhouden.

energiebronnen aantrekkelijker worden door de stijgende olie- en gasprijzen en milieubeperkingen. Bovendien blijven enkel de moeilijk ontginbare oliebronnen over. (Energiesparen.be, 2006)

Tabel 2: Voorraden fossiele brandstoffen

Fossiele brandstof	Bewezen reserves/productie (aantal jaar)
Aardolie	40,5
Aardgas	65,1
Steenkool	155
Uranium	60 à 6000

Bron: op basis van Energiesparen.be (2006) en Ifest (2006)

De hoeveelheid uranium is afhankelijk van hoe het uranium wordt gebruikt. Bij kernfusietechnieken bijvoorbeeld wordt er nog veel minder uranium gebruikt. Maar hier wordt niet verder op ingegaan.

De huidige maatschappij is niet de eerste beschaving in de wereldgeschiedenis die te maken krijgt met een energiecrisis. Maar er zou moeten geleerd worden uit het verleden. De wetten van de thermodynamica moeten gerespecteerd worden. Wanneer een maatschappij tracht de beperkingen van het energiesysteem te passeren, gaat ze haar ondergang tegemoet. Bij elke samenleving draait het om de beschikbaarheid van een energieoverschot. Wanneer er onvoldoende energiereserves beschikbaar zijn die kunnen worden gewonnen en benut, wordt het onmogelijk om de welvaart van de mensen te vergroten. De eerste wet van de thermodynamica stelt dat de totale hoeveelheid energie in het universum constant blijft. Dit wordt ook de wet van behoud van energie genoemd. De tweede wet van de thermodynamica houdt in dat de totale entropie in het heelal steeds toeneemt. Energie verandert continu van vorm, maar kan slechts van vorm veranderen in één richting: van geordend naar ongeordend, van bruikbaar naar onbruikbaar. Een deel van de beschikbare energie gaat verloren. Het verlies van deze bruikbare energie wordt entropie genoemd. Entropie omkeren binnen een systeem is mogelijk, er wordt weer meer orde aangebracht, maar hiervoor moet energie worden toegevoegd. De totale entropie stijgt echter steeds. Volgens Rifkin (2002) overleven stabiele maatschappijen het langst. Dit zijn samenlevingen die een zo goed mogelijk evenwicht creëren tussen het budget van de natuur en de maatschappelijke budgetten van de mens, dus de tweede hoofdwet van de thermodynamica indachtig. Het tempo waarin de energie gebruikt wordt moet men proberen gelijk te houden met de snelheid waarmee de energie het afval kan recycleren en de energiebronnen kan herstellen. De auteur ziet in de manier waarop het grote Romeinse Rijk haar energiebronnen totaal heeft uitgeput en hieraan is ten onder gegaan een waarschuwing voor de huidige maatschappij, nu deze bezig is haar goedkope fossiele brandstoffen uit te putten. Olie en gas worden niet enkel gebruikt voor transportdoeleinden, maar ook de voedselproductie en het elektrische netwerk dat zorgt voor stroom, licht en warmte steunen op het gebruik van fossiele brandstoffen. Wanneer deze wegvallen, stort de hele maatschappij in elkaar.

Ook volgens Bossel, Eliasson en Taylor (2005) kan de huidige levensstandaard enkel behouden worden door hernieuwbare energiebronnen aan te spreken. Bovendien moeten energieverliezen in het distributiesysteem geminimaliseerd worden.

2.2 Ecologie

Ook ecologie speelt mee in de energieproblematiek. Door de verbranding van fossiele brandstoffen worden verschillende gassen uitgestoten, waaronder ook kwalijke. Eén soort gassen die geëmitteerd worden zijn de broeikasgassen, waaronder CO₂, die in de inleiding al aan bod kwamen. Op zich zijn deze gassen niet schadelijk, maar nodig, anders zou de temperatuur op aarde onleefbaar zijn, maar wanneer er teveel broeikasgassen worden uitgestoten kan dit wel allerlei nadelige effecten hebben. In hoofdstuk 3 wordt er verder ingegaan op het Kyoto-protocol en het engagement om de uitstoot van broeikasgassen te beperken. Bij volledige verbranding zouden de uitlaatgassen enkel uit CO₂ en waterdamp bestaan. Bij onvolledige verbranding echter, die in de praktijk plaatsvindt, komen nog verschillende andere componenten vrij. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a) Wanneer de samenstelling van de uitlaatgassen van een auto bekeken wordt, kan er in tabel 3 bemerkt worden dat naast de broeikasgassen, opgenomen in de vierde rij bij klimaateffecten, ook nog een aantal andere gassen worden uitgestoten die schadelijk kunnen zijn voor mens en milieu. Er wordt een overzicht gegeven van de effecten en de pollutanten die ervoor verantwoordelijk zijn. De effecten zijn gerangschikt volgens de verschillende gebieden waarop ze spelen. Uit de tabel blijkt dat de uitlaatgassen zowel hun effecten hebben op de menselijke gezondheid, het klimaat en de ecosystemen als op gebouwen. Bovendien zorgen auto's voor lawaai en trillingen. Deze kunnen schade aan gebouwen aanrichten en eventueel tot gezondheidsproblemen leiden (Mayeres, Proost en Van Dender, 1997). Ook nemen ze ruimte in. De straat is niet langer een speelplaats voor kinderen of een plaats waar volwassenen bij elkaar komen.

Tabel 3: Componenten van de uitlaatgassen van een auto

	Effets	Polluants
Santé humaine	Effets carcinogènes	COV (1,3 Butadiène ; Formaldéhyde ; Benzène) HAP (Benzo(a)pyrène ; Benzo(a)anthracène ; Dibenzo(a)anthracène)
	Effets respiratoires (composants organiques)	COV (COVNM ; méthane)
	Effets respiratoires (composants non-organiques)	CO, PM, TSP (Particules totales en suspension), NOx (en NO ₂ éq.), SO ₂
Climat	Effet de serre	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Eco-systèmes	Ecotoxicité	VOC (Benzène ; Toluène) ; HAP
	Acidification, eutrophisation	NOx (en NO ₂ éq.), SO ₂
Bâtiments	Salissures, dégradations	PM ₁₀ , SO ₂
Bruit	Gène	Bruit [en dB(A)]

Bron: Hecq (2003: 7)

De verschillende effecten worden verder besproken in de paragraaf 2.3.1 over de externe effecten van personenvervoer. Fijn stof, weergegeven door PM^3 (Particulate Matter) (of ook PM_{10}) in de tabel 3 op de vorige pagina heeft een belangrijke invloed op de volksgezondheid, schrijven Van Mierlo et al. (2006). Uitlaatemissies van fijn stof bestaan vooral uit zeer kleine deeltjes ($PM_{2,5}$) die het schadelijkst zijn voor de mens omdat die diep in het lichaam kunnen doordringen. Voornamelijk dieselveertuigen stoten fijn stof uit (Int Panis et al., 2004), wat ook ongezonde stoffen zoals roetdeeltjes en PAK's⁴ bevat. In tabel 3 worden de schadelijke effecten van de PAK's, aangeduid door HAP, weergegeven. De Europese Richtlijn 98/70/EG bepaalt dat de grenswaarde van PAK's in diesel en benzine maximaal één massapercent mag zijn vanaf 1 januari 2000 (Ministerie Vlaamse Gemeenschap, 2003) Fijn stof heeft dus een dubbele schadelijke werking. Het werkt direct, omdat het zo klein is en diep in de longen kan doordringen. Zo kunnen de deeltjes uiteindelijk mee worden opgenomen in de bloedbanen. De indirecte werking bestaat erin dat zware metalen, PAK's en dioxines zich kunnen vasthechten aan de stofdeeltjes en zo eveneens het menselijke lichaam kunnen binnendringen. Ook verzurende stoffen als SO_2 en NO_x gaan zich binden aan het fijne stof. De opname van deze stoffen in het bloed leidt tot een verhoogd risico op hartziekten en klachten aan de luchtwegen. Zelfs vervroegde sterfte kan een gevolg zijn. (VUB, VITO en CEESE, 2005) Roetfilters kunnen bijvoorbeeld wel gebruikt worden om de emissies van PM te verminderen tot meer dan 85 %. PM_{10} wordt in een aantal studies eveneens in verband gebracht met gezondheidsklachten. Dit geldt zowel bij kortstondige blootstelling – in de grootte orde van een aantal uren of dagen – aan hoge concentraties als bij langdurige blootstelling aan lage concentraties. (VRIND, 2002) Fijn stof kan ook leiden tot een vermindering van de zichtbaarheid (Mayeres, Proost en Van Dender, 1997). In 1999 formuleerde de Europese Unie een aantal grenswaarden voor de gemiddelde concentraties van PM_{10} . Tegen 2010 mag de concentratie nog slechts $20 \mu g/m^3$ bedragen. (VRIND, 2002) Het wegverkeer is naar schatting verantwoordelijk voor 22 % van de totale uitstoot van fijn stof. (Emis, 2006) Het is moeilijk om te voorspellen hoe de evolutie van fijn stof in de emissies zal verlopen, omdat er grote onzekerheid heerst omtrent verschillende parameters. Vooral het bestaan van enkele voertuigen die een zeer grote uitstoot hebben doordat ze door ouderdom of defecten niet goed meer functioneren, de evolutie van het dieselsegment binnen de voertuigvloot en de extra emissies afkomstig van het gebruik van de airconditioning in de wagen zijn drie parameters waarrond grote onzekerheid heerst. Een betere inspectie en onderhoud zouden de eerste parameter al kunnen verminderen. (Int Panis et al., 2004)

Geluid en lawaaihinder van hun kant kunnen de levenskwaliteit aanzienlijk verminderen. Momenteel is het wegverkeer de grootste veroorzaker van geluidshinder in Vlaanderen. Meer

³ PM is de afkorting van Particulate Matter en verwijst dus naar stofdeeltjes. $PM_{2,5}$ betekent dan bijvoorbeeld dat de deeltjes kleiner zijn dan $2,5 \mu m$. Bij PM_{10} bedraagt de diameter van de stofdeeltjes minder dan $10 \mu m$.

⁴ PAK's of polycyclische aromatische koolwaterstoffen zijn organische verbindingen die bestaan uit benzeenringen. Ze ontstaan bij onvolledige verbranding of verkooling van diverse koolstof bevattende materialen zoals fossiele brandstoffen en voedingsmiddelen. Ze kunnen kankerverwekkende eigenschappen hebben en gevolgen voor het cardiovasculair stelsel. HAP is de Franse afkorting van PAK. (zie tabel 2) (Emis, 2006)

bepaald 60 % van de lawaaihinder is afkomstig van het verkeer (Emis, 2006). Geluidshinder afkomstig van het wegverkeer wordt in Vlaanderen gemeten met het percentage van de bevolking, dat blootgesteld wordt aan een geluidsdrumniveau hoger dan 65 dB(A) (akoestische decibel). (De Ceuster, 2004) De reglementering heeft weliswaar tot gevolg gehad dat het motorgeluid gereduceerd is, de toename van het aantal voertuigen heeft deze daling volledig teniet gedaan (Van Mierlo et al., 2006). De norm voor het motorgeluid van personenwagens bedraagt momenteel 75 dB(A) voor diesel- en 74 dB(A) voor benzine wagens. (Emis, 2006) Dit geluidsniveau wordt gemeten op een afstand van 7,5 m van de wagen en werd vastgelegd in Richtlijn 92/97/EEG. (MIRA, 2005) Op langere termijn kan het geluidsniveau van het verkeer voor irreversibele schade zorgen. Geluid en trillingen resulteren in een verstoring van bijvoorbeeld slapen, communiceren en lezen. Hierdoor kan de menselijke gezondheid indirect beïnvloed worden en kunnen daaruit vermoeidheid, hoofdpijn, onrustige slaap, verhoogde bloeddruk en zelfs hartklachten volgen. (Emis, 2006) Naast technische aspecten speelt ook het rijgedrag een grote rol in de hoeveelheid lawaai van een voertuig. Het sensibiliseren van de bevolking kan dus eveneens voor een afname van de geluidshinder zorgen. Geluidshinder is een zeer lokaal fenomeen. Bovendien is de geluidshinder van het verkeer moeilijk te onderscheiden van die van de industrie en andere bronnen. (De Ceuster, 2004)

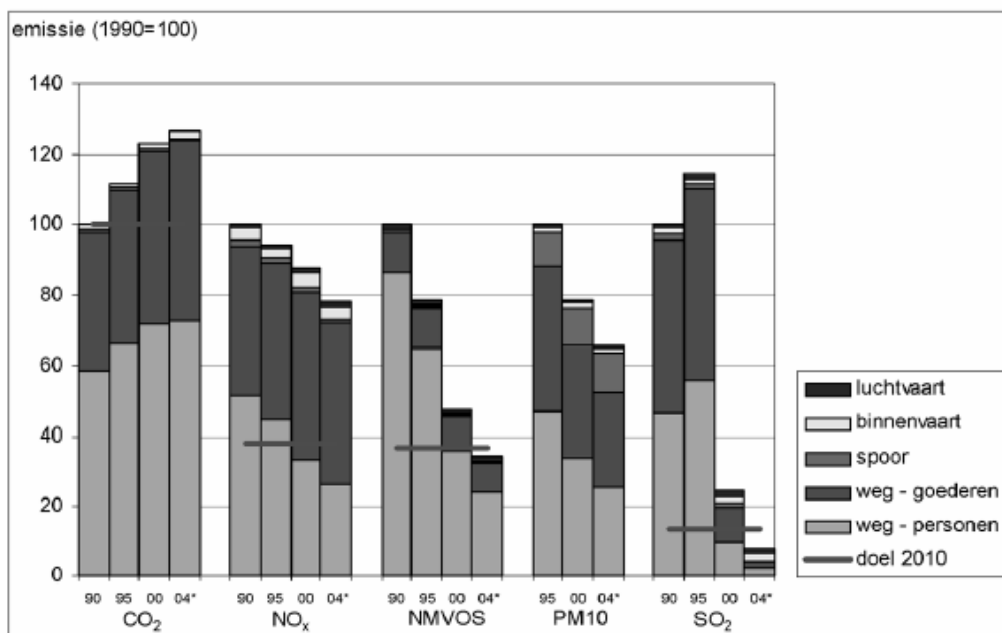
COV (Composés Organiques Volatiles) in tabel 3 is de Franse vertaling van Vluchtige Organische Stoffen (VOS). Hiertoe behoren de NMVOS en methaan. Vluchtige Organische Stoffen zijn een verzameling van KWS-verbindingen of koolwaterstofverbindingen. Naast een indirecte invloed op de menselijke gezondheid via ozonvorming, kunnen een aantal stoffen in de groep koolwaterstoffen ook een direct effect op de gezondheid hebben. Benzeen en 1,3-butadieen zijn de voornaamste kankerverwekkende stoffen in deze groep. 33 % van de totale uitstoot van koolwaterstoffen is afkomstig van het verkeer. (Emis, 2006)

In Vlaanderen is de bijdrage van transport aan schadelijke emissies groot. Transport is verantwoordelijk voor 47 % van de NO_x-uitstoot en 19 % van de CO₂-emissies. Bovendien neemt het 17 % van NMVOS⁵ en 14 % van PM₁₀ voor zijn rekening. Enkel bij SO₂⁶ is het aandeel van transport in de totale uitstoot beperkt tot 1 %. (Van Mierlo et al., 2006) Dit heeft te maken met het verminderen van het zwavelgehalte in de diesel en benzine. Volgens een Europese richtlijn (98/70/EG) mag diesel voor wegvoertuigen sinds 2005 maximaal 50 ppm zwavel bevatten. (VRIND, 2004/2005; Ministerie Vlaamse Gemeenschap, 2003) Een voorstel tot wijziging van deze richtlijn wil tegen 1 januari 2009 alle brandstoffen zwavelvrij maken. Zoals in figuur 4 duidelijk

⁵ NMVOS zijn Vluchtige Organische Stoffen exclusief methaan. (Niet-Methaan Vluchtige Organische Stoffen). Ze zijn kankerverwekkend. (VRIND, 2004/2005) Ze worden in zulke lage concentraties uitgestoten dat de blootstelling van de bevolking bijzonder laag is. (In Panis, et al., 2001)

⁶ SO₂ of zwaveldioxide is een verzurend bestanddeel, net zoals stikstofoxides of NO_x en ammoniak (NH₃). (VRIND, 2004/2005) De evolutie van NH₃ is niet opgenomen in figuur 4, maar wel terug te vinden in bijlage 2. SO₂ kan volgens Emis (2006) ook schade toebrengen aan de luchtwegen en bij langdurige irritatie kan de kans op infecties toenemen.

wordt gemaakt, vertonen de meeste schadelijke stoffen die worden uitgestoten door transport een dalende trend, ook al neemt het aantal voertuigkilometers toe. Enkel CO₂ kan deze evolutie niet volgen, want de CO₂-uitstoot is inherent aan het verbruik van brandstof. (Van Mierlo et al., 2006; Transport & Mobility Leuven, 2006) Deze emissies zijn rechtstreeks afhankelijk van de totale hoeveelheid verbruikte brandstof en dus van het aantal voertuigkilometers. Het aantal voertuigen neemt toe, wat in bijlage 1 getoond wordt, waardoor de invloed van technische maatregelen zoals energiezuinigere wagens, teniet gedaan wordt. De lijnen per pollutant op de figuur tonen de respectievelijke reductiedoelstellingen van 2010 voor Vlaanderen. Deze werden vastgesteld in het Protocol van Göteborg⁷ en de NEC-richtlijn (Richtlijn Nationale Emissieplafonds of National Emission Ceilings). (De Vlieger et al., 2001) De doelstellingen voor Vlaanderen voor 2010 zijn in de transportsector vastgelegd op 22,2 kton voor NMVOS, 1 kton voor SO₂ en 35,6 kton voor NO_x. (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2003) Cijfergegevens en een grafiek van de evolutie van de emissies van het wegverkeer van 1990 tot 2003 zijn opgenomen in bijlage 2.



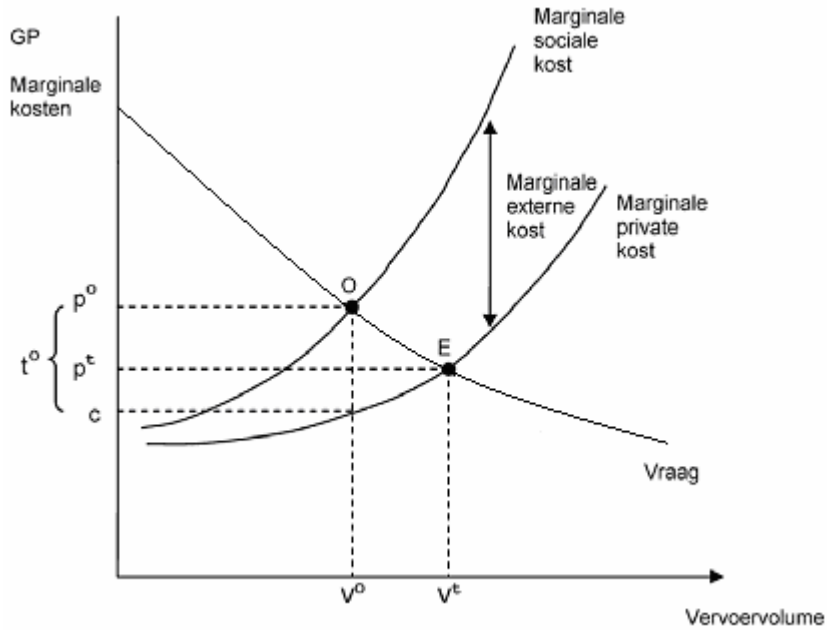
Figuur 4: Emissies van schadelijke uitlaatgassen in Vlaanderen door transport (Van Mierlo, J. et al., 2006: 453)

⁷ Het Protocol werd in 1999 te Zweden opgesteld. Het bevat emissieplafonds voor 2010 voor vier vervuilende stoffen; SO₂, NO_x, VOC en NH₃. (United Nations Economic Commission for Europe, 2006) Het Protocol van Göteborg en de Richtlijn Nationale Emissieplafonds werden parallel uitgewerkt voor dezelfde pollutanten. Het gebied waarop ze van toepassing zijn verschilt echter. Terwijl de toepassing van de NEC-Richtlijn beperkt is tot het grondgebied van de EU, is het Protocol van Göteborg van toepassing op de 15 lidstaten van de EU, de Midden- en Oost-Europese landen, Canada, de Verenigde Staten en Rusland. De NEC-richtlijn legt evenwel scherpere emissiemaxima op dan het Protocol van Göteborg en is sowieso bindend, terwijl de engagementen in het kader van het Protocol pas bindend worden op het moment van de ratificatie. (Milieu-info, 2006)

2.3 Economie

Het energieprobleem heeft ook een economisch aspect, namelijk een kostenaspect. Hier valt niet enkel de directe kost voor de consument onder, namelijk de prijs die hij betaalt voor zijn brandstof en voor zijn voertuig (aangezien deze eindverhandeling voornamelijk over auto's handelt), maar ook belastingen en subsidies worden in acht genomen bij de keuze voor een bepaald voertuig of een bepaalde brandstof. Vanuit het standpunt van de overheid bekeken, bevat de kost voor energie niet enkel de interne of private kosten, ook de externe⁸ kosten moeten in rekening worden gebracht om tot een maatschappelijk optimum te komen. Als men enkel rekening houdt met private kosten en baten, komt men in een evenwicht waar de sociale kost de sociale opbrengst overschrijdt. Er wordt teveel gereden. In figuur 5 wordt in een vereenvoudigde voorstelling, toegepast op een transportvoorbeeld, geïllustreerd dat de echte kost, de sociale kost, onderschat wordt wanneer men enkel rekening houdt met de private kosten en niet met de externe. Zo komt men tot een vervoersvolume V^t dat alle verplaatsingen bevat waarvoor de waardering van een weggebruiker zijn minimale private kost overschrijdt. De totale sociale kost is hier duidelijk groter dan de betaalde prijs. Het verschil is de marginale externe kost, dit wil zeggen de vernadering in de totale externe kost door een extra gereden vervoerskilometer. Om aan prijszetting te doen, moet steeds naar de marginale kosten en opbrengsten worden gekeken. Het echte maatschappelijke optimum wordt bereikt bij vervoersvolume V^o . Dit is het optimum dat men zou moeten trachten te bereiken. Dat is de rol van het prijsmechanisme in een goed functionerende economie. De marktprijs geeft aan hoeveel het kost om een goed te leveren en de gebruikers drijven hun consumptie op tot de extra voordelen van bijkomende consumptie gelijk zijn aan de prijs die ze voor die bijkomende consumptie moeten betalen. De kost die door de gebruikers gepercipieerd wordt is dus niet correct wanneer er externe kosten in het spel zijn en hier geen rekening mee wordt gehouden.

⁸ Externe kosten zijn kosten die niet door de individuele economische entiteit die de kosten veroorzaakt, maar wel door de gemeenschap, worden gedragen. (Proost et al., 2002; De Brabander, 2005) De veroorzaker houdt dan ook geen rekening met deze externe kosten bij zijn individuele beslissingen. Ze worden afgewenteld op de samenleving, andere landen of op toekomstige generaties. (De Ceuster, 2004)



Figuur 5: Het principe van prijszetting (op basis van De Borger en Proost, 2006: 265)

Begg, Fischer en Dornbusch (2003) zeggen dat wanneer de consument geen rekening houdt met de externe kosten, de overheid er misschien voor kan zorgen dat dit wel gebeurt, bijvoorbeeld door belastingen op te leggen.

2.3.1 Externe kosten van het personenvervoer

De externe kosten van personenvervoer hebben betrekking op de kosten en het verlies van welvaart die een extra vervoerkilometer veroorzaakt voor anderen. De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) vermelden dat een deel van de kosten die worden veroorzaakt door een transportgebruiker niet gedragen worden door de gebruiker zelf, maar door andere transportgebruikers of door de samenleving in haar geheel. Naast de strikt monetaire kosten horen hierbij onder andere ook tijdsverliezen en luchtverontreiniging. Een transportgebruiker houdt wel rekening met de interne, maar niet met de externe kosten in zijn beslissingsproces. Als gevolg daarvan zijn de keuzes van de transportgebruikers vanuit maatschappelijk standpunt bekeken niet optimaal zoals ook al aangetoond in figuur 5 in de vorige paragraaf. Er wordt teveel gereden. De externe kosten van het wegverkeer verschillen sterk naargelang de plaats, het tijdstip en het voertuigtype: oudere voertuigen vervuilen meer dan nieuwe, dichtbevolkte gebieden hebben meer hinder van lawaai en milieuhinder en de kosten van fileproblemen liggen hoger in de spits- dan in de daluren. In wat volgt worden er enkele cijfergegevens van Griet De Ceuster (2004) weergegeven ter illustratie. In de weergegeven schadekosten zitten zowel kosten van luchtvervuiling, klimaatverandering, geluidshinder, fileproblemen als ongevallen en schade aan het

wegdek vervat. Een gemiddeld voertuig veroorzaakte in 2002 in een niet-stedelijk gebied ongeveer schade met een kost van 110 EUR/Mm (dit is 11 EUR schade per 100 km). In een stedelijk gebied echter liep de schadekost in de piekperiode op tot 970 EUR/Mm of 97 EUR per 100 km. Wanneer er een uitsplitsing gemaakt wordt naargelang het soort voertuig, valt het op dat dieselwagens (259 EUR/Mm) een grotere schadekost hadden dan benzinewagens (244 EUR/Mm) voor 2002⁹. (De Ceuster, 2004) Doordat de externe kosten zo sterk verschillen voor elk type autorit (spits- versus daluren, vervuilende versus minder vervuilende auto's, in en buiten de steden, voorzichtige versus minder voorzichtige bestuurders) is het moeilijk om ervoor te zorgen dat voor elk type autorit de optimale vraag naar autovervoer wordt bereikt. De optimale vraag wordt bereikt in het punt waar de vraagcurve de marginale sociale kostencurve snijdt. Hiervoor kan ook de vorige paragraaf geraadpleegd worden. In dit punt is de prijs die de autobestuurders willen betalen dan ook gelijk aan de marginale sociale kost. (Mayeres en Proost, 2004)

De categorieën externe kosten die de auteurs en Mayeres et al. (2001) onderscheiden zijn: materiële kosten, tijdskosten, ongevalkosten en milieukosten. Deze laatste kunnen onderverdeeld worden in drie subgroepen, namelijk kosten verbonden aan luchtverontreiniging, geluidshinder en klimaatverandering. Bij de luchtverontreiniging en klimaatverandering speelt niet alleen de schade voor de rest van de maatschappij een rol, ook de nadelige effecten voor toekomstige generaties moeten in acht worden genomen. Enkele andere externe kosten die misschien nog kunnen genoemd worden zijn plaatsgebruik, geurhinder en lichthinder. In wat volgt wordt er steeds over *marginale* externe kosten gesproken, omdat die belangrijk zijn voor een juiste prijszetting, niet de totale externe kosten.

2.3.1.1 Marginale externe congestiekosten (MECK)

Wanneer een bijkomende weggebruiker de tijdskosten en de materiële kosten voor de andere weggebruikers doet stijgen, worden dit marginale externe congestiekosten genoemd. De snelheid van de andere weggebruikers daalt, de tijd die ze in hun wagen besteden neemt toe. Om de ernst van de fileproblematiek aan te duiden, kan Witlox (2006) aangehaald worden, die schrijft dat alle Belgen samen in 2003 12,67 miljoen uren in de file stonden. Dit kostte de Belgische economie ruim 150 MEUR/jaar. De auteur vreest dat dit alleen maar erger zal worden aangezien de prognoses voor de mobiliteitsgroei voor 2010 variëren van 25 % tot 40 %. Deze categorie externe kosten zijn veruit de belangrijkste. (Van Herbruggen en Proost, 2002)

De congestiekosten kunnen in twee groepen worden verdeeld, namelijk niet-recurrente en structurele of recurrente congestiekosten. Files zijn een structureel element, dit wil zeggen dat ze

⁹ Deze schadekosten worden niet correct aangerekend. Volgens De Ceuster (2004) betaalt een weggebruiker gemiddeld 183 EUR/Mm voor een dieselwagen, waarvan 69 EUR/Mm belastingen. Voor een benzinewagen wordt 284 EUR/Mm betaald, waarin 116 EUR/Mm belastingen begrepen zitten.

ontstaan omdat de vraag de aanwezige capaciteit overschrijdt. Maar daarenboven zijn ze ook niet-recurrent. Ze zijn namelijk ook deels afhankelijk van stochastische verschijnselen en niet-perfect voorspelbare elementen zoals weersomstandigheden en ongevallen. (Mayeres et al., 2001)

De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) verdelen de tijdskosten van de reizigers die tengevolge van de congestie ontstaan onder in twee categorieën, meer bepaald de tijdskosten in het voertuig en de "schedule delay" kosten, dit zijn de kosten van het te vroeg of te laat aankomen. Reizigers verliezen tijd terwijl ze in het voertuig zitten. Deze tijd wordt beïnvloed door een extra weggebruiker door de relatie die bestaat tussen de gemiddelde snelheid en de verkeersstroom. Bovendien passen ze hun vertrektijden aan in functie van het congestieniveau. Volgens de auteurs zijn de marginale externe congestiekosten afhankelijk van de grootte van de verkeersstroom en de samenstelling ervan, de impact van een bijkomend voertuig op de gemiddelde snelheid van de andere reizigers en de waardering van de verandering van de tijdskosten. De moeilijkheid bij het meten van de marginale externe filekosten is dat het gecompliceerd is om de monetaire waarde van een tijdsbesparing¹⁰ te bepalen. Volgens De Brabander (2006) kan voor een private verplaatsing een waarde van een tijdsbesparing van 9 EUR/h verdedigd worden. Deze geldt voor verplaatsingen tot en met 80 min, heen en terug. Voor langere verplaatsingen zou de waardering lager liggen. De waardering ligt hoger voor individuen jonger dan 40 jaar dan voor oudere personen en is volgens De Brabander (2006) niet afhankelijk van de hoogte van het gezinsinkomen.

Er kan gezegd worden dat de tijd in de file zorgt voor minder vrije tijd, waardoor er minder consumptie is, omdat men minder tijd heeft om te consumeren. De tijd in de file vermindert ook de tijd die men heeft om te werken, waardoor het inkomen daalt.

Er kunnen wel een paar conclusies gemaakt worden over de marginale externe congestiekosten. In de spitsuren zijn ze groter dan in de daluren doordat tijdens de spitsuren meer mensen getroffen worden door de vertraging in de snelheid. Volgens De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) is de gemiddelde waarde van een tijdsbesparing dan hoger en de impact van een bijkomend voertuig op de snelheid groter. In stedelijke gebieden zijn de MECK groter dan in niet-stedelijke gebieden. Tijdens de spitsuren zijn de MECK hoog in stedelijke gebieden omdat het netwerk dan sterk verzadigd is.

Een verhoging van de capaciteit is een mogelijke oplossing om de congestie (recurrente en niet-recurrente) te verminderen. Capaciteitstoename wijzigt het congestieprofiel en leidt tot een daling van de globale congestiekost. (Mayeres et al., 2001)

¹⁰ De monetaire waarde van een tijdsbesparing wordt door De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) gedefinieerd als het bedrag dat men wil betalen om zijn reistijd met één tijdseenheid te verminderen.

2.3.1.2 Marginale externe ongevalkosten

Een bijkomende weggebruiker veroorzaakt drie soorten ongevalkosten voor de maatschappij: a) de kosten verbonden aan het eigen ongevalrisico, b) de kosten verbonden aan de verandering van de gemiddelde ongevalkosten en c) de aanpassingskosten¹¹ van andere weggebruikers. De weggebruikers kunnen de marginale externe ongevalkosten op verscheidene manieren beïnvloeden. Het aantal kilometers dat ze afleggen, het al of niet gebruiken van de veiligheidsuitrusting en de keuze van het voertuig zijn enkele voorbeelden. Deze laatste twee kunnen best via verkeersregels of aansprakelijkheidsregels gestuurd worden, beweren De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006).

- a) De maatschappelijke kost van het ongevalrisico waaraan een weggebruiker wordt blootgesteld bestaat uit zijn eigen nutsverlies, materiële schade van het ongeval, en zuiver economische kosten namelijk medische kosten, kosten verbonden aan interventie van politie, brandweer en ambulance, de begrafeniskosten als het om een overlijden gaat en de waarde van het toekomstige outputverlies. De weggebruiker houdt bij zijn beslissingen rekening met zijn eigen ongevalrisico en de kosten die daar voor hem aan verbonden zijn. Dit deel van de kosten is dus al geïnternaliseerd. De verplichte verzekering voor burgerrechtelijke aansprakelijkheid dekt voor de passagiers de zuiver economische kosten wel, voor de bestuurders zijn deze extern. De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) veronderstellen dat dit voor inzittenden bij het openbaar vervoer ook het geval is. In tabel 3 worden de zuiver economische kosten weergegeven per ongevaltype. Bij dodelijke slachtoffers wordt het (netto-) outputverlies bekomen door het verschil te nemen tussen het bruto-outputverlies en de eigen consumptie. Bij gewonden wordt het bruto-outputverlies weergegeven. De Brabander (2005) verklaart dat voor gewonden het bruto-outputverlies wordt genomen omdat men veronderstelt dat het consumptiegedrag niet wijzigt na een ongeval.

¹¹ Aanpassingen van andere weggebruikers kunnen op verschillende manieren gebeuren, bijvoorbeeld door een veiligere auto te kopen, trager te rijden, een andere route te nemen of door een veiliger vervoermiddel te gebruiken. (De Nocker, Int Panis en Mayeres ,2006)

Tabel 4: De zuivere economische kosten per slachtoffer voor 2004 (in EUR/slachtoffer)

	Dodelijke slachtoffers	Ernstig gewonden	Licht gewonden
Zuivere economische kosten (€)	65100	390500	1640
Aandeel			
Medische kosten (incl. bezoekkosten)	4,6%	2,5%	27,1%
Politie, brandweer, ambulance	1,8%	0,3%	53,2%
Begrafenis	2,5%		
Outputverlies*	91,1%	97,2%	19,8%

* Netto-outputverlies in het geval van dodelijke slachtoffers en bruto-outputverlies in het geval van gewonden

Bron: De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006: 392)

Alle verkeersongevallen vermijden zou de Belgische economie en overheid 12,2 GEUR kosten in 2002. (De Brabander, 2006) Dit zou dan overeenkomen met een totale vermijdingskost voor verkeersongevallen van ongeveer 1,2 kEUR/jaar per Belg. Hierin is echter de betalingsbereidheid van de individuen gebaseerd op internationale onderzoeken. Omdat de Belg bereid is om meer te betalen door het grotere gevoel van onveiligheid dat hij heeft ten opzichte van de buitenlanders volgens De Brabander (2006), is de waarde van 12,2 GEUR een onderschatting. In zijn doctoraatsonderzoek kwam De Brabander tot de conclusie dat de maatschappelijke betalingsbereidheid in het totaal 6,8 MEUR voor het vermijden van een dodelijk slachtoffer bedraagt, voor een zwaargewonde gemiddeld 1,5 MEUR, en voor een lichtgewonde 107 kEUR. De betalingsbereidheid voor zwaargewonde slachtoffers varieert naargelang de ernst van het letsel. Ook de aard van de verplaatsing speelt een rol in de betalingsbereidheid. Ter vergelijking bedraagt het BBP ongeveer 30 kEUR/jaar per Belg. Deze nieuwe gegevens zouden de totale waarde van het vermijden van alle verkeersongevallen in België verhogen tot 30 GEUR. (De Brabander, 2006) Volgens De Ceuster (2004) zijn de marginale externe ongevalkosten het hoogst voor motorbestuurders en zwakke weggebruikers door het grotere ongevalrisico en de hogere graad van ernst van de ongevallen. De marginale externe ongevalkosten verlopen in een dalende trend. Dit valt te verklaren doordat het aantal ongevallen daalt terwijl het aantal voertuigkilometers sterk toeneemt. (De Ceuster, 2004)

- b) De gemiddelde ongevalkosten van de andere weggebruikers worden beïnvloed via de impact op het aantal ongevallen per kilometer en door een effect op de gemiddelde ernst van de ongevallen. Dit onderdeel van de marginale externe ongevalkosten stijgt met het ongevalrisico, de gemiddelde kosten per ongeval, de elasticiteit van het ongevalrisico en de kosten van het ongeval ten opzichte van het aantal voertuigkilometers. Naargelang er een

groter deel van de kosten van het ongeval gedragen wordt door de weggebruiker zelf, dalen de gemiddelde ongevalkosten van de andere weggebruikers. Het berekenen van deze component is niet eenvoudig omdat de vereiste informatie niet volledig beschikbaar is. Om de gemiddelde kosten van een ongeval te kunnen kwantificeren is het noodzakelijk om een waarde te geven aan het voorkomen van een overlijden, de "Value of Preventing a Statistical Fatality" (VPF). De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) benadrukken dat het niet gaat om de waarde van een specifiek leven, of met andere woorden om het bedrag dat een persoon zou ontvangen ter compensatie van een overlijden. De VPF drukt eerder de totale bereidheid tot betalen uit voor kleine verminderingen op individuele risico's op overlijden. Pruyt (2006) zegt dat de VPF ongeveer 1,6 MEUR bedraagt. Volgens De Brabander (2006) is deze waarde zoals eerder vermeld een onderschatting. De humane verliezen, zonder rekening te houden met productieverliezen of de kosten die verband houden met het ongeval maar door de maatschappij gedragen worden¹², bedragen volgens hem ongeveer 6,1 MEUR.

- c) De kosten verbonden aan een lagere snelheid zijn impliciet opgenomen in de marginale externe congestiekosten, die in de vorige paragraaf besproken werden. Toch is het gedrag van de bevolking een zeer belangrijke, zo niet de belangrijkste factor die meespeelt in het aantal ongevallen. (Machetto, 2006; Immers, 2006; Wets, 2006) Om de burgers veiliger te doen rijden, voert de overheid ook een aantal campagnes. Hier kan gedacht worden aan de "U rijdt wild want..."- en "U raast langs de werken want..."-borden naast de weg. Voorheen konden ook de "U bedankt voor de bus want..."- en de "U rijdt links want..."-campagnes gezien worden. Om het beleid te doen slagen, is het belangrijk dat er een grote pakkans en onmiddellijke beboeting is. Als er geen controle is, wordt er niets bereikt. (Machetto, 2006) Maar de reglementering moet redelijk, rationeel en transparant zijn. Een factor die nog bijdraagt tot een grotere veiligheid wordt gevormd door allerlei passieve en actieve technieken in de auto die ervoor zorgen dat de wagen steeds veiliger wordt. Ook de aanpak van de zwarte punten, waarvoor volgens Kris Peeters (2006) jaarlijks 100 MEUR wordt uitgetrokken in Vlaanderen, kent een positieve evolutie. (Wets, 2006) Hier brengt Van Breedam (2006) tegenin dat er toch onvoldoende middelen gebruikt worden voor het onderhoud van de wegen. Nog geen 1,5 % van het Bruto Nationaal Product wordt hieraan besteed, hoewel dit belangrijk is voor het performant houden van het netwerk en het doen dalen van het aantal ongevallen.

¹² Deze kosten kunnen onderverdeeld worden in twee categorieën. De eerste groep zijn de kosten in verband met het ongeval zelf zoals schade aan het openbare domein en private bezittingen, administratieve kosten van verzekeringsmaatschappijen, publieke en private gerechtelijke kosten, interventies van politie of brandweer en kosten die ontstaan ten gevolge van files. De andere categorie kosten houden verband met het slachtoffer, namelijk medische kosten, bezoeken en vervoer van begrafeniskosten. (De Brabander, 2006)

2.3.1.3 Marginale externe milieukosten

Deze kostengroep werd al kort besproken onder de paragraaf Ecologie, maar omdat getracht wordt de nadelige effecten voor het milieu te kwantificeren, horen de externe milieukosten ook onder paragraaf Economie. Voorbeelden van een verlies aan milieukwaliteit dat optreedt wanneer er een bijkomende voertuigkilometer gereden wordt, zijn schade aan gezondheid, gebouwen en landbouw door de luchtverontreiniging. Ook lawaaihinder kan nadelig zijn voor de gezondheid. VRIND (2004/2005) geeft weer dat 14 % van de Vlaamse bevolking ernstige geluidshinder van verkeer en vervoer zegt te ondervinden. Toch is de schade op Vlaamse schaal nog eerder gering. (De Ceuster, 2004)

Een aantal landen trachten de klimaatverandering en de nadelige effecten die daaruit voortkomen tegen te gaan door zich te engageren voor het Kyoto-protocol. Zo willen ze de uitstoot van CO₂ beperken. In het volgende hoofdstuk wordt het Kyoto-protocol behandeld. De economische waardering van de luchtverontreiniging en klimaatverandering wordt besproken in Bickel en Friedrich (2005). De auteurs geven de meest gebruikte en de best onderbouwde kengetallen. Het zijn deze cijfers die de basis vormen van het onderzoek van vele transport-, mobiliteits- en milieuproblemen. De vermijdingskost voor het Kyoto-protocol wordt tussen 5 EUR/ton CO₂ en 20 EUR/ton CO₂ geschat. Bickel en Friedrich (2005) nemen 19 EUR/ton CO₂ als centrale waarde voor de vermijdingskost per ton CO₂.

Een ander extern milieueffect is de zure regen. Zure regen wordt veroorzaakt doordat er SO₂, NO_x of NH₃ in het regenwater wordt opgenomen. (Dassen, 1990) Bij verbranding in motoren van auto's wordt zwavel, dat aanwezig is in de brandstof, omgezet in SO₂. Op zich is die SO₂ geen zuur gas, maar in de atmosfeer kan het gemakkelijk omgezet worden in zwavelzuur (H₂SO₄) dat goed oplost in water en zo in de regen terecht komt. Ook NO_x¹³ ontstaat bij de verbranding van fossiele brandstoffen. Hoewel er maar een minieme hoeveelheid stikstof in de brandstof zit, wordt er toch NO_x uitgestoten die in de atmosfeer omgezet wordt in salpeterzuur (H₂NO₃). Beide stoffen zijn terug te vinden in tabel 3 op pagina 30 bij de verzurende effecten op het ecosysteem. Deze effecten kunnen verstrekkende gevolgen hebben. Water wordt zuur waardoor de vissen allerlei afwijkingen aan de kieuwen krijgen of sterven en vegetaties worden aangetast. Hierdoor gaan er hele bossen vroegtijdig dood, door aantasting van de bast waardoor schimmels en bacteriën vrij spel krijgen en door wegvreten van de beschermlaag en huidmondjes van de bladeren waardoor die kunnen uitdrogen. Bovendien maken de zure stoffen in de bodem metaaldeeltjes los van de bodemdeeltjes waaraan ze normaal vastzitten. Ook gebouwen worden aangetast door zure neerslag. NH₃, dat via een aantal stappen ook in H₂NO₃ kan omgezet worden, ontstaat niet bij verbranding van fossiele brandstoffen, maar kan wel vrijkomen bij het gebruik van katalysatoren.

¹³ Hoe hoger de temperatuur, hoe makkelijker stikstofoxiden of NO_x uit de lucht ontstaan bij een verbrandingsproces. (VROM, 2006)

(VRIND, 2004/2005) Verzurende stoffen kunnen zich ook gewoon als een gas door de lucht verspreiden. Naast de na-oorlogse industrialisatie is het verkeer de grootste veroorzaker van de verzuring. Zoals op de figuur 4 pagina 33 te zien is, is de hoeveelheid NO_x en SO₂ die uitgestoten wordt door het verkeer de laatste jaren wel afgenomen. De verzuring kan echter niet enkel door binnenlandse maatregelen aangepakt worden, want de meerderheid van de zure stoffen in België zijn uit het buitenland afkomstig.

NO_x kan bovendien aanleiding geven tot hoge ozonconcentraties, net zoals PAK's of koolwaterstoffen. Te hoge ozonconcentraties kunnen leiden tot irritatie van keel, neus en ogen, ademhalingsmoeilijkheden of zelfs aantasting van de longen. (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2006) Ozon versterkt bovendien de effecten van verzuring (Mayeres, Proost en Van Dender, 1997). CO, ook opgenomen in tabel 3, is een zeer gevaarlijk gas. Hoofdpijn en misselijkheid zijn de eerste symptomen van CO-vergiftiging. Te hoge concentraties zijn dodelijk.¹⁴ Het verkeer is in België verantwoordelijk voor 70 % van de totale CO-uitstoot. (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2006) Volgens Emis (2006) is dit 50 %.

Er zijn twee methodes om de externe milieukosten te berekenen, schrijven De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006).

- a) De route-effectbenadering volgt elke pollutant vanaf de uitstoot door de wagen via verspreiding over straten en steden. De interactie met andere pollutanten, met eventuele vorming van nieuwe pollutanten tot gevolg, wordt bestudeerd en eveneens de schadelijke effecten voor mensen, dieren, planten en materialen. In deze benadering wordt de externe milieukost berekend als het verlies van welvaart voor de huidige en de toekomstige generaties als gevolg van deze effecten. Omdat deze aanpak veel kennis en data vereist, is ze niet toepasbaar voor alle mogelijke effecten. Een schematische voorstelling van de route-effectbenadering, is opgenomen in de bijlage 3.
- b) De tweede benadering, eigenlijk een second-best benadering, is de methode van de schaduwrijzen en vereist dat er voor een bepaalde pollutant een emissieplafond vastgesteld wordt. Een bijkomende voertuigkilometer leidt tot extra uitstoot van die pollutant die op een andere plaats moet gecompenseerd worden. Dit leidt tot een bijkomende kost voor emissiereducties, die men dan bij deze methode de externe milieukost van die extra voertuigkilometer noemt. De gevolgen van klimaatsverandering worden berekend via de benadering van de schaduwrijzen. De externe kost wordt dus bepaald op basis van de marginale kost om in de EU aan de Kyoto-doelstelling te voldoen. De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) komen tot een kost van 5 tot 20 EUR/ton CO₂.

¹⁴ CO vermindert de opname van zuurstof in het bloed. Bovendien speelt CO ook een rol bij het broeikas effect door omzettingen in CO₂. (Mayeres, Proost en Van Dender, 1997)

Deze milieukost is niet gelijk aan de prijs van een ton minder CO₂-uitstoot. De prijs wordt bepaald door de prijs van de emissierechten op de markt. Momenteel is de geldende marktprijs van een ton CO₂ ongeveer 1 EUR. Zo laag heeft de prijs nog nooit gestaan. De lage prijs is te wijten aan een overschot van emissierechten op de Europese markt. Voor 2008 wordt er weer een normalere prijs van 20 tot 30 EUR/ton CO₂ verwacht. (Emissierechten.nl, 2007)

Ook bij de externe milieukosten moet er een waardering gebeuren van de verkorting in de levensverwachting ten gevolge van luchtverontreiniging. Het probleem is dat een toenemende luchtverontreiniging leidt tot een risico dat de algemene gezondheid vermindert, zeggen De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006). Dit kan zich binnen enkele decennia uiten in een daling van de levensverwachting met enkele dagen of maanden. Hierdoor is een studie nodig om te bepalen hoeveel een gemiddelde burger vandaag wil betalen om te voorkomen dat de levensverwachting in de toekomst daalt. De schattingen van deze waarde lopen sterk uiteen. Bickel en Friedrich (2005) komen volgens De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) tot een waardering van een verloren levensjaar (VOLY of Value Of a Year Lost) van 50 000 EUR voor een chronisch effect, tot 75 000 EUR voor een acuut effect. Er wordt nog verder onderzoek uitgevoerd om de waardering nog te verbeteren. Voor bepaalde impacts zoals de vermindering van het functioneren van de longen is een waardering in geldtermen nog niet mogelijk.

De belangrijkste conclusies in verband met de externe milieukosten die Mayeres et al. (2001) afleiden zijn dat deze kosten significant zijn, afhankelijk van de locatie (in de stad zijn de externe milieukosten veel hoger dan op het platteland¹⁵), de technologie en de brandstof. De meeste auteurs benadrukken dat er rekening gehouden moet worden met een aanzienlijke onzekerheid. (Mayeres et al., 2001; De Nocker, Int Panis en Mayeres, 2006) Int Panis et al.(2001) voegen hier nog aan toe dat de externe milieukosten afhankelijk zijn van de snelheid waarop wordt gereden. Ze zijn het laagst op de landelijke wegen door de middelmatige snelheid en dus een gering brandstofverbruik. Bij hogere snelheden, zoals op de autosnelweg, wordt er meer verbruikt evenals bij lagere snelheden, namelijk in het stadsverkeer. Bij lagere snelheid wordt meer geschakeld, waardoor er meer brandstof wordt verbruikt en er dus meer wordt uitgestoten (De Ceuster, 2004). De blootstelling in de landelijke gebieden is bovendien laag door de kleine bevolkingsdichtheid. In steden worden veel meer mensen blootgesteld aan de emissies. Deze lage blootstelling in landelijke gebieden moet wel genuanceerd worden. Doordat de bevolkingsdichtheid in de landelijke gebieden in Vlaanderen in vergelijking met de rest van Europa relatief hoog is, behoren de externe kosten van het autoverkeer in de landelijke gebieden in Vlaanderen tot de hoogste van Europa. In bijlage 4 wordt een overzicht gegeven van de externe milieukosten per kilometer, weergegeven in functie van de evolutie van het wagenpark.

¹⁵ In steden worden meer mensen gehinderd door de geluidsoverlast en de emissies van het verkeer. Hierbij komt nog dat ook de externe congestiekosten in de steden groter zijn dan op het platteland omdat de congestieproblemen groter zijn binnen of rond de steden. (Van Herbruggen en Proost, 2002)

De Europese wetgeving in verband met de emissienormen van auto's (Richtlijn 98/69/EG, Richtlijn 2001/1/EG en Richtlijn 2001/100/EG) heeft er voor gezorgd dat er in België de invoering van Euro 0-, Euro 1-, Euro 2-, Euro 3- – die gelden sinds 2002 – en Euro 4- – deze zijn van kracht sinds 2006 – normen heeft plaatsgehad waaraan nieuwe voertuigen moeten voldoen. In 2009 worden de Euro 5-voertuigen verwacht. (VOKA, 2007; Europees Parlement, 2007) In elke categorie scoren de wagens wat betreft de externe milieukosten beter dan de voorgaande soorten. De oude dieselwagens (met een bouwjaar voor 1993) hebben de hoogste externe kosten. Maar pas de Euro 3-dieselwagens presteren beter dan de benzine wagens van 10 jaar ervoor. Martens (2006) pleit dan ook voor een verjonging van het wagenpark om zo de externe milieukosten te verlagen. Het wagenpark zou dan uit relatief meer wagens van een hogere Euro-categorie bestaan. Over dit voorstel wordt nog meer verteld onder paragraaf 2.3.2.5 Andere maatregelen. In de volgende tabel 5 wordt een overzicht gegeven van de normen voor personenwagens voor de verschillende uitgestoten stoffen voor de verscheidene Eurocategorieën.

Tabel 5: Emissienormen voor personenwagens in de verschillende Eurocategorieën

EU emissienormen voor personenwagens, g/km

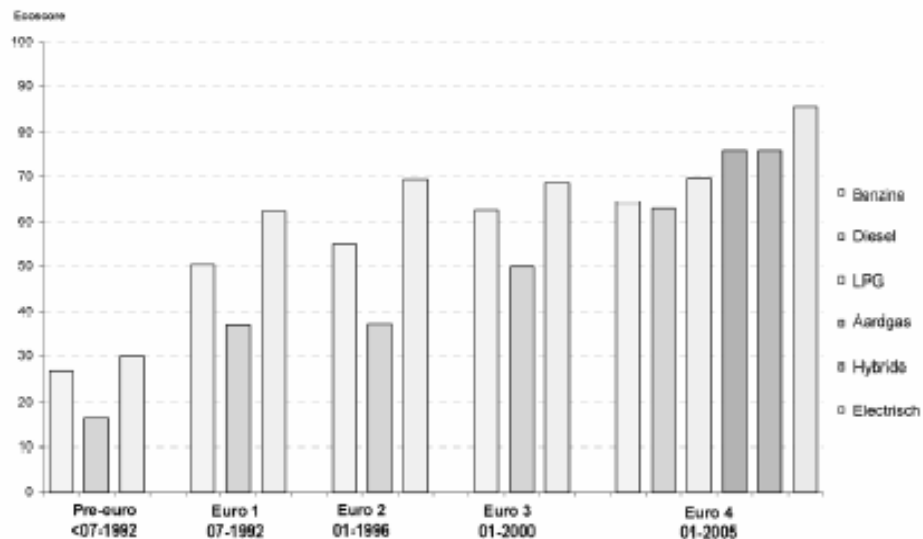
Reeks	Jaar	CO	HC	HC + NOx	NOx	PM
DIESEL						
Euro 1	7/1992	2.72	–	0.97	–	0.14
Euro 2, IDI	1/1996	1.0	–	0.7	–	0.08
Euro 2, DI	1/1996 ^a	1.0	–	0.9	–	0.10
Euro 3	1/2000	0.64	–	0.56	0.50	0.05
Euro 4	1/2005	0.50	–	0.30	0.25	0.025
BENZINE						
Euro 1	7/1992	2.72 (3.16)	–	0.97 (1.13)	–	–
Euro 2	1/1996	2.2	–	0.5	–	–
Euro 3	1/2000	2.30	0.20	–	0.15	–
Euro 4	1/2005	1.0	0.10	–	0.08	–

a – tot 30.09.1999 (nadien IDI norm)

Bron: De Brabander (2005: 167) en JRC, IPTS en ESTO (2003a: 155)

De twee types oplossingen om de externe milieukosten te verminderen die door Mayeres et al. (2001) worden genoemd, zijn het doorgaan met de technologische vernieuwing of het realiseren van een verschuiving naar alternatieve transportmodi, aangezien het aantal geregistreerde wagens en het aantal autokilometers elk jaar stijgen. Er kan ook getracht worden het aantal dieselwagens relatief te verminderen ten opzichte van het aantal benzine wagens, dewelke een lagere externe

milieukost hebben. Dit wordt ook duidelijk geïllustreerd in figuur 6. Hoe hoger de Ecoscore van een bepaald voertuig, hoe minder belastend het voertuig is voor het milieu. De Ecoscore is een maatstaf die zowel rekening houdt met broeikaseffect, gezondheidseffecten en effecten op ecosystemen als met geluidshinder. De verschillende effecten tellen respectievelijk voor 50 %, 20 %, 20 % en 10 % mee. De bijdragen van de verschillende polluenten aan de verschillende delen van de maatstaf worden gecombineerd tot één cijfer. De Ecoscore geeft een cijfer weer van 0 tot 100 waarbij 100 het meest milieuvriendelijke is. (VUB, VITO en CEESE, 2005; Van Mierlo et al., 2006) Het is duidelijk dat benzinevoertuigen voor elke Eurocategorie beter scoren dan dieselveertuigen, want ze hebben een hogere Ecoscore. Bovendien wordt nog eens getoond dat elke Eurocategorie een betere Ecoscore dan de vorige, eerdere categorieën heeft. De Ecoscore is gebaseerd op een Well-to-Wheels-analyse die rekening houdt met de directe emissies die ontstaan tijdens het rijden, maar ook met de indirecte uitstoot afkomstig van de productie en distributie van de brandstof.



Figuur 6: Ecoscore van personenvoertuigen met verschillende brandstof/aandrijflijn en ouderdom, maar met eenzelfde cilinderinhoud (Van Mierlo et al., 2006:478)

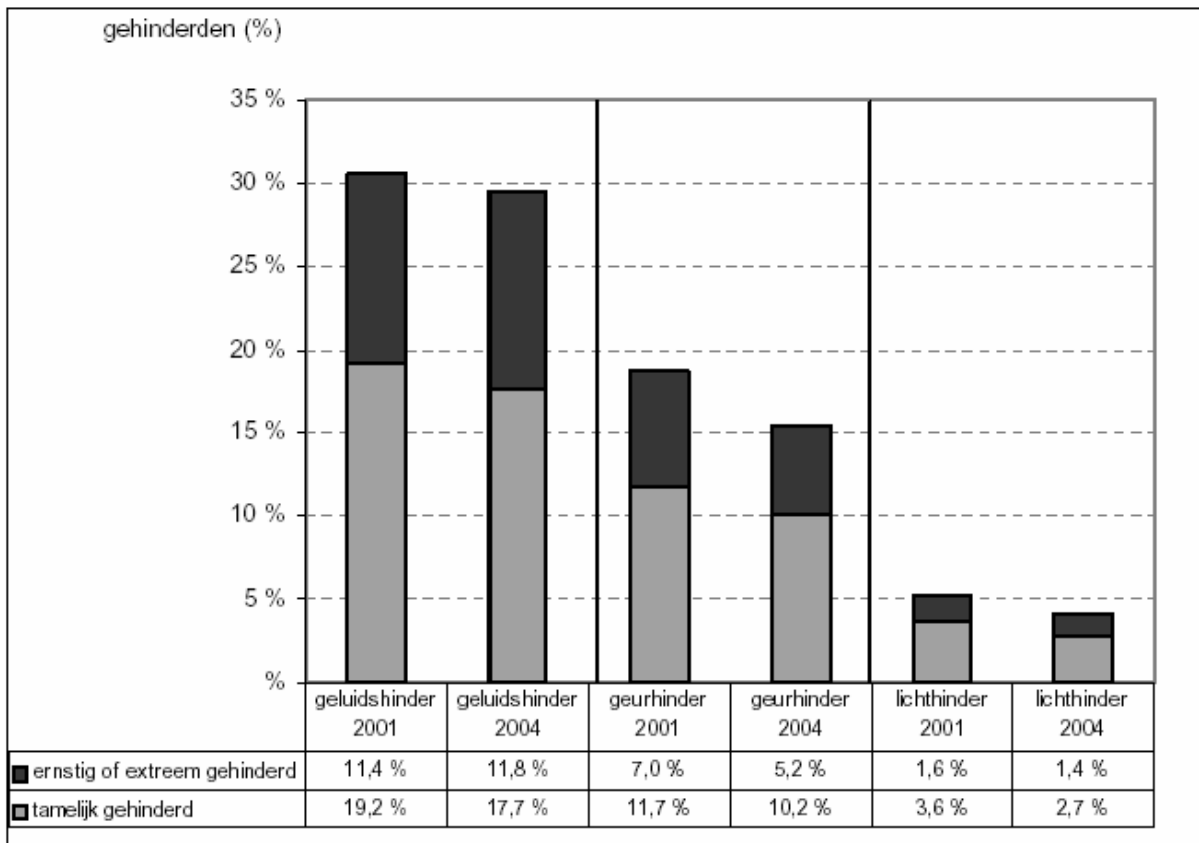
2.3.1.4 Marginale externe kosten van lawaaihinder, plaatsgebruik, geurhinder en lichthinder

Geluidsoverlast werd al besproken in paragraaf 2.2 Ecologie. Parkeerheffingen kunnen volgens Mayeres en Proost (2004) een belangrijke bijdrage leveren tot de stedelijke verkeersproblematiek. Zo kunnen de externe kosten van plaatsgebruik verminderd worden. Een van de oorzaken van de verkeersoverlast in de steden is dat er op sommige plaatsen gratis parking voorzien is. Er treden dan inefficiënties op omdat de kost van deze parkeerplaatsen eigenlijk niet nul is. Het gratis ter beschikking stellen van parkeerplaatsen stimuleert het autogebruik en het verbruik van benzine.

Door gebruikers te laten betalen voor parkeerplaatsen kan een welvaartswinst van 30 % ten opzichte van het fictieve "optimale beleid" gerealiseerd worden. Omdat de heffing niet kan gedifferentieerd worden tussen spits- en daluren, is de winst slechts 30 %, anders had hij nog hoger kunnen zijn. Volgens De Borger, Kerstens en Van Dender (1997) is het opleggen van parkeerheffingen een goede benadering om de externe congestiekosten te verminderen wanneer rekeningrijden sociaal of politiek onaanvaardbaar wordt geacht of de kosten van het systeem van rekeningrijden te hoog zijn. De parkeerheffingen moeten wel gedifferentieerd worden in functie van de externe kosten. De heffingen in de gebieden met meer congestie moeten dan hoger komen te liggen. Een belangrijk nadeel van het invoeren van parkeerheffingen is dat op die manier enkel de problemen van het stedelijke verkeer aangepakt worden en niet die van het interregionale verkeer. Bovendien ontsnappen de pendelaars die op private parkings parkeren aan de heffing, schrijven de auteurs. De heffingen benadelen de personen die korte afstanden afleggen, omdat de tarieven moeilijk kunnen gedifferentieerd worden naar de afgelegde afstand.

Voertuigen nemen ook ruimte in op straat. Kinderen spelen veel minder op straat dan vroeger. Ook volwassenen komen er minder bij elkaar. Er heerst nog grote onzekerheid over de impact van het minder buitenspelen op de gezondheid en het geluksgevoel van de kinderen.

Volgens VRIND (2004/2005) ondervindt 3,7 % van de Vlaamse inwoners extreme geurhinder door verkeer en vervoer. Deze is afkomstig van de PM-deeltjes en PAK's in de uitlaatgassen van de auto. Er vond wel een daling plaats in 2004. De blootstelling aan geur kan directe gezondheidsklachten geven wanneer toxische stoffen worden ingeademd. Vooral de dosis van de stoffen die wordt ingeademd is hier van belang. Geurwaarneming treedt evenwel meestal al op bij lage concentraties aan verontreinigende stoffen en de waarneming treedt beperkt in de tijd op. Geur heeft bijgevolg in de eerste plaats een belangrijke signaalfunctie. Indirecte gezondheidsklachten die in de wetenschappelijke vakliteratuur worden aangehaald als gevolg van ernstige geurhinder zijn symptomen als slapeloosheid, ademhalingsproblemen, duizeligheid, hoofdpijn, oog-, keel- en neusirritatie, allergische reacties, hoest, hijgen en maagklachten. (Milieu-info, 2006) Lichthinder afkomstig van vervoer, wat de belangrijkste bron van dit soort overlast is, stoorde in 2004 1,4 % van de Vlamingen. De gegevens van het percentage Vlaamse inwoners dat zich tamelijk en extreem gehinderd voelde door geur, licht en geluid in 2001 en 2004 volgens MIRA (2005) wordt getoond in figuur 7. Deze cijfers komen ongeveer overeen door de cijfers die genoemd worden door VRIND (2004/2005). Er is een duidelijke daling van het percentage Vlamingen dat zich in 2004 gehinderd voelde tegenover dat van 2001.



Figuur 7: Gerapporteerde hinder door geluid, geur en licht in Vlaanderen (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Algemeen Milieu- en Natuurbeleid, 2004b; geciteerd door MIRA, 2005)

Een ander extern effect dat ter volledigheid genoemd kan worden zijn de externe kosten van schade aan het wegdek. Omdat deze schade echter vooral veroorzaakt wordt door zwaardere vrachtwagens en niet door personenwagens, wordt hier niet verder op ingegaan. (Mayeres, Proost en Van Dender, 1997)

2.3.2 Internaliseren van de externe kosten

Begg, Fischer en Dornbusch (2003) en Mayeres en Proost (2004) stellen dat wanneer er geen rekening gehouden wordt met externe kosten (of baten), het optimum dat bereikt wordt niet het juiste, maatschappelijke optimum is. Er is overconsumptie (Mayeres et al., 2001; Torfs, 2005; Blauwens, 2006). Daarom is het noodzakelijk dat de externaliteiten in acht genomen worden. Wanneer de burgers dit zelf niet doen, is het de rol van de overheid om te zorgen voor een

internalisering¹⁶ van de externe kosten, of om er met andere woorden voor in te staan dat de mensen bij hun beslissingen ook rekening houden met de kosten voor de maatschappij. Een internalisering van de externe kosten wordt bereikt wanneer de belastingen op wegverkeer gelijk zijn aan de marginale externe kosten van wegverkeer, dus de externe kosten per bijkomende gereden voertuigkilometer. Dit optimum moet dan gelden voor elk type voertuig op elke plaats op elk moment. (De Ceuster, 2004) Een klein deel van de externe kosten wordt al geïnternaliseerd door de bestaande belastingen en verzekeringen. (Mayeres, 2006)

De Borger en Proost (1997) vermelden dat de implementatie van de internalisering van marginale externe kosten wordt bemoeilijkt door twee factoren. Allereerst zijn de berekening en inschatting van de externe kosten niet eenvoudig. Bovendien is het niet duidelijk wat de reactie van de transportgebruikers zal zijn op een nieuwe prijszetting. Daarbij komt dat een perfecte aanrekening van de externe kosten meestal niet mogelijk is. In dit geval moet getracht worden optimaal af te wijken van het basisprincipe.

Witlox (2006) noemt nog enkele mogelijkheden om via prijsinstrumenten en regelgeving de auto-afhankelijkheid te doen dalen. De overheid kan op deze verschillende vlakken inspelen. Er kan gebruik gemaakt worden van belastingssystemen (vaste en periodieke belastingen, brandstofbelastingen, kilometervergoeding, wegenvignetten, parkeerheffingen, rekeningrijden) of subsidies (bijvoorbeeld het openbaar vervoer gratis maken, of goedkoper). Regulering kan gebruikt worden om een gedragsverandering te verwezenlijken. Dit kan bijvoorbeeld via regulering gericht op minder schadelijke technologieën, verkeersreglementen – zoals dodehoekspiegels en snelheidsbeperkingen – regulering met betrekking op de brandstoffen, gericht op het verminderen van verkeersvolumes en betere benutting van vervoerscapaciteit. Hier kan bijvoorbeeld aan carpooling worden gedacht. Om de verkeersveiligheid te verbeteren kunnen verbodsmaatregelen zeker van pas komen. (Mayeres en Proost, 2004) De overheid tracht gedragsveranderingen bij de bevolking te realiseren, door het verstrekken van allerlei informatiebrochures, zoals de brochure “Ideeën voor energiebewust en veilig rijden”. Ook Wets (2006) sluit hierbij aan door te zeggen dat de bevolking bewust moet gemaakt worden van hun mobiliteitsgedrag. Een andere vorm van informatieverstrekking die de overheid kan vervullen, is bijvoorbeeld zorgen voor de marketing van bepaalde milieuvriendelijke alternatieven zodat de bevolking zich bewust wordt van hun bestaan. Dit is vooral interessant bij de alternatieven die zich in figuur 3 in de onderste categorie bevinden en dus nu al rendabel zijn ten opzichte van de benzinewagen. Hier wordt in hoofdstuk 5 nog op teruggekomen. Een vijfde maatregel die de overheid kan verwezenlijken is rantsoenering. Dit wordt kort besproken onder paragraaf 2.3.2.5 Andere maatregelen.

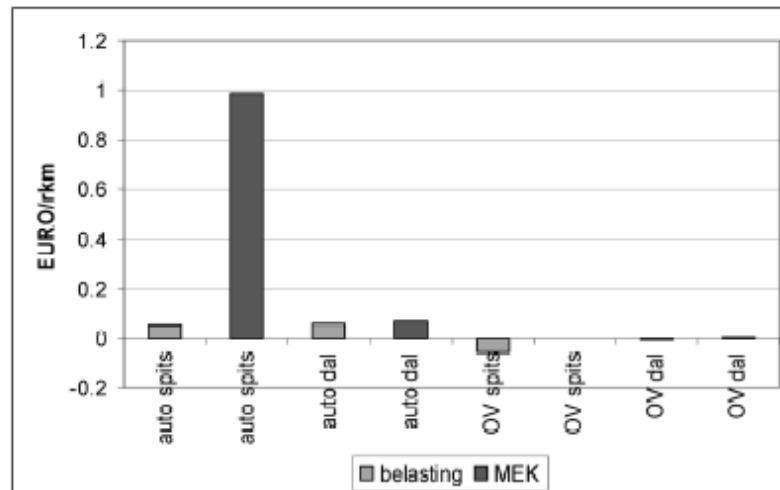
¹⁶ Schade en hinder zijn niet altijd van monetaire oorsprong. De schade dient daarom vaak berekend te worden aan de hand van waarderingstechnieken. De berekening van externe kosten bevat vrij veel onzekerheden die zowel te maken kunnen hebben met de inschatting van de impact van de neveneffecten zelf als met het waarderen ervan in geldtermen. (De Ceuster, 2004)

Blauwens (1988) merkt hier wel bij op dat heffingen het meest efficiënt zijn om externe effecten te internaliseren. Normen opleggen of verbieden werkt ook wel, maar niet zo efficiënt. Deze benaderingen zijn namelijk te zwart-wit; een norm die bijvoorbeeld een maximale emissie oplegt voor een bepaalde stof, laat alle activiteiten die er juist onder zitten volledig ongemoeid. Activiteiten echter die de norm net overschrijden moeten volledig verdwijnen. Een correcte selectiviteit wordt echter bereikt door een heffing op te leggen die het externe effect aanreken aan de gebruiker, zodat die beslist of een bepaalde activiteit wordt uitgevoerd of niet.

2.3.2.1 Evolutie verschillende kostencategorieën en huidig prijsbeleid

Wat betreft de verschillende externe kostencategorieën beweren De Borger en Proost (2006) dat de risico's op ongevallen toch al enigszins onder controle worden gehouden. Men is er bijgevolg in geslaagd om deze externe kosten te laten afnemen. Toch ligt Vlaanderen wat betreft verkeersveiligheid achter op de rest van Europa. Het mobiliteitsplan Vlaanderen wil hier iets aan doen en achterstand in verkeersveiligheid tegen 2010 in vergelijking met de Europese koplopers gehalveerd zien. (VRIND, 2004/2005) Ook de marginale externe milieukosten lopen volgens de auteurs in dalende lijn, want de vervuiling van de wagens is al sterk afgenomen per afgelegde kilometer. Wat betreft de marginale externe congestiekosten echter, komt er geen noemenswaardige verbetering in de fileproblematiek. Dit is zoals gezegd de belangrijkste externe kostencategorie.

De meest extreme vorm om in de prijsstructuur van het vervoer in te grijpen is rekeningrijden, waarbij men de tarieven van vervoer zoveel mogelijk differentieert in tijd en ruimte in functie van de verkeersdrukke. Dit zou in de indeling van Witlox (2006) onder de categorie belastingen vallen. In België is er momenteel nog geen expliciet prijsbeleid om de congestieproblematiek aan te pakken. De verklaring hiervoor is dat het Belgische beleid vreest dat prijshervormingen of rekeningrijden negatieve neveneffecten op de arbeidsmarkt kunnen hebben doordat ze bijvoorbeeld het arbeidsaanbod kunnen ontmoedigen. Daarom kiest men voor een indirecte aanpak door de alternatieven van autovervoer te stimuleren. In figuur 8 wordt duidelijk gemaakt dat de kloof tussen de huidige belastingen en de marginale externe kosten in België zeer groot is. In de linkerkolom worden de belastingen en in de rechter de marginale externe kosten weergegeven. De negatieve belasting bij OV spits staat voor een subsidie. Onder de paragraaf 2.3.2.4 Belastingen of subsidies kan ook teruggevonden worden dat de belastingen in Vlaanderen moeten verdrievoudigen om gelijk te zijn aan de externe kosten gemiddeld voor de verschillende voertuigcategorieën. De kloof tussen de huidige belastingen en de externe kosten is dus nog zeer groot. Doordat de belastingen niet aan de externe kosten gekoppeld zijn, geven ze bijna geen prikkels om de veroorzaakte schade te verminderen. (De Ceuster, 2004)



Auto = kleine dieselauto, 1 inzittende, autosnelweg; OV = trein; MEK = marginale externe kosten; rkm = reizigerkilometer

Figuur 8: Kloof tussen de huidige belastingen en de marginale externe kosten (De Borger en Proost, 2006: 267)

Wanneer het huidige prijsbeleid vergeleken wordt met de ideale belastingsstructuur, namelijk een structuur waarbij de overheid perfect alle vaste jaarlijkse belastingen en alle verbruiksbelastingen kan bepalen, kunnen een aantal verschilpunten bemerkt worden. (De Borger en Mayeres, 2006; geciteerd door De Borger en Proost, 2006) De belasting tijdens piekperiodes dient drastisch verhoogd te worden en veel hoger te liggen dan de belasting op het rijden tijdens de dalperiode om de externe congestiekosten in rekening te brengen. De gebruiksbelasting op diesel moet hoger komen te liggen dan die op benzine omdat diesel een grotere kost van vervuiling heeft. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 4. De hogere gebruiksbelastingen zouden gecompenseerd worden door een daling in de vaste belastingen, zoals de jaarlijkse verkeersbelasting of de belasting op in verkeerstelling. De Borger en Proost (2006) concluderen dat de huidige belasting op diesel veel hoger moet komen te liggen wanneer men rekening houdt met de emissies per kilometer. Als men de congestiekost beschouwt, zijn de huidige gebruiksbelastingen veel te laag en de vaste belasting op autobezit te hoog. Bovendien moet er veel sterker gedifferentieerd worden naar de verkeersdrukke en de vervuilingsgraad.

2.3.2.2 Belastingen

Volgens De Borger en Proost (2006) en Krause (2003) is een betere prijszetting het enige instrument dat toelaat om het fileprobleem op een adequate manier in te perken. Door alle gebruikers de marginale externe kosten die ze veroorzaken aan te rekenen, worden ze geconfronteerd met de werkelijke kosten van hun vervoerskeuzes. Enkel het vervoer waarvoor de weggebruiker bereid is de totale maatschappelijke kost te betalen, zal nog plaatsvinden.

In figuur 5 op pagina 35, zou de belasting dan gelijk moeten zijn aan $(p^0 - c)$, de marginale externe kost van een bijkomende rit. De belastingmaatregel heeft ook enkele nadelen. Wanneer de vraagcurve naar vervoer stijf verloopt, inelastisch is met andere woorden, is ze ongevoelig voor prijsstijgingen. De mensen hebben dan bijvoorbeeld geen alternatieve keuzemogelijkheden. Voor deze mensen is het een zeer nadelige maatregel om belastingen op te leggen omdat ze geen andere keuze hebben. Een voorwaarde voor de aanvaarding van de belasting is dat de overheid de inkomsten uit de belastingen gebruikt voor een doel waar de bevolking mee vooruit gaat.¹⁷ Anders zullen de mensen volgens De Borger en Proost (2006) en Mayeres en Proost (2004) niet geneigd zijn om meer te betalen. Ook moet er gekeken worden naar hoe goed er kan gedifferentieerd worden met een bepaald prijsinstrument. Om congestie te corrigeren kunnen bijvoorbeeld geen brandstofbelastingen gebruikt worden, want die kunnen niet gedifferentieerd worden naar tijd en plaats. Een bijkomende moeilijkheid van een brandstofbelasting is dat de overheid niet goed kan observeren voor welk doel een auto en de autobrandstof gebruikt wordt. Vaste belastingen op de aankoop van het voertuig kunnen wel gedifferentieerd worden voor het soort voertuig, zodat auto's en vrachtwagens, of benzine- en dieselwagens bijvoorbeeld anders belast kunnen worden. Een optimaal takseringsbeleid bestaat er volgens Van Herbruggen en Proost (2002) uit dat de consument de externe kosten krijgt aangerekend die hij veroorzaakt. De optimale heffingen verschillen dan ook tussen piek- en daluren omdat een extra voertuig nauwelijks congestie veroorzaakt in de daluren, maar wel in de piekuren. Vervuilende voertuigen moeten ook zwaarder belast worden dan meer milieuvriendelijke alternatieven. Ook De Ceuster (2004) stemt hiermee in. Het opleggen van de optimale heffingen is moeilijk omdat er speciale technologieën nodig zijn om gedifferentieerde heffingen uit te voeren en omdat de heffingen zouden leiden tot erg sterke en dus onpopulaire toenames ten opzichte van de huidige taksen. Deze tegenstand is deels te begrijpen omdat weggebruikers meer zullen moeten betalen voor hun verplaatsingen. Maar een betere prijszetting zal de door het verkeer veroorzaakte schade aanzienlijk verminderen en bovendien zal de overheid extra middelen ontvangen die ze nuttig kan gebruiken. Hier wordt later nog op teruggekomen.

2.3.2.3 Subsidies

Artikel 145²⁸ in het Wetboek van de Inkomstenbelastingen geeft aan dat er een belastingvermindering toegekend wordt op de aankoop van een auto of minibus met een CO₂-uitstoot onder een bepaalde grenswaarde om de bevolking aan te zetten tot het gebruik van energiezuinigere voertuigen. De vermindering bedraagt 15 % van de aanschaffingswaarde met een

¹⁷ Volgens De Borger, Proost en Van Dender (1997) worden de inkomsten uit de externaliteiten dan best gebruikt om versturende belastingen, zoals de belasting op arbeid, te verlagen.

maximum van 3280 EUR¹⁸ bij een uitstoot kleiner dan 105 g/km en 3 % van de aanschaffingswaarde met een maximum van 615 EUR wanneer de CO₂-emissie tussen 105 en 115 g/km ligt. (Codex Fiscaal Recht, 2005/2006) Er zijn sterke aanwijzingen dat de subsidie voor milieuvriendelijke voertuigen geen goede subsidie is. De kost van de subsidies overtreft het bedrag van de uitbetaalde middelen, waardoor de baten niet opwegen tegen de kosten. Dit komt door de opportuniteitskost van de overheidsgelden, die in België volgens De Borger en Proost (2006) hoog ligt. Bovendien heeft de autosector een oligopolistische structuur¹⁹ waardoor subsidies op de aankoopprijs zouden kunnen zorgen voor prijsverhogingen door de producent in een monopolistische marktstructuur. Er zijn volgens de auteurs verschillende aanwijzingen dat de autofabrikanten inderdaad hun consumentenprijzen aanpassen aan de geldende subsidies zodat het effect van de subsidies wordt tenietgedaan. De Nocker, Int Panis en Mayeres (2006) merken evenwel op dat subsidies voor het openbaar vervoer voor een stijging van de vraag zorgt die de marginale baat van de andere reizigers die gebruik maken van het openbaar vervoer verhoogt. Men kan redelijkerwijs aannemen dat een stijging van de vraag op middellange termijn een aanpassing van het aanbod tot gevolg heeft, zoals het inleggen van meer voertuigen of grotere voertuigen. Door meer voertuigen in te leggen op nieuwe lijnen of op bestaande lijnen kan er respectievelijk een daling van de wandeltijd en een vermindering van de gemiddelde wachttijd van de andere reizigers optreden. Dit is een externe baat. Van Herbruggen en Proost (2002) zeggen dat het onterechte kostenvoordeel dat momenteel nog steeds geldt voor personenwagens ten opzichte van het openbaar vervoer opgelost moet worden door het verhogen van de taksen op het autoverkeer. Zo zal de vervoerskost nauwer aansluiten bij de kost die het transport werkelijk veroorzaakt. De Borger en Proost (2006) voegen hieraan toe dat de basis voor subsidies in het openbaar vervoer niet de lagere externe kost mag zijn ten opzichte van de wagen, maar het bestaan van externe baten. De kleinere externe kost ten opzichte van het autoverkeer pleit er juist voor om de externe kosten van het autoverkeer aan te rekenen, schrijven de auteurs. Ze vermelden eveneens dat rekeningrijden het gebruik van het openbaar vervoer beter stimuleert dan het subsidiëren van het openbaar vervoer. (Van Dender en Proost, 2003; geciteerd door De Borger en Proost, 2006) Het subsidiëren van het openbaar vervoer om het aandeel van het openbaar vervoer in het personenvervoer te verhogen is een minder goede maatregel omdat de emissiereducties beperkt zijn. Bovendien is de welvaartskost van deze maatregel sterk afhankelijk van de omstandigheden. (Van Herbruggen en Proost, 2002) In gebieden met veel congestie kan stimulering van het openbaar vervoer leiden tot minder uitstoot aan een lage kost. In rustige, landelijke gebieden daarentegen kan er zelfs een toename zijn van de emissies met daarbovenop een kost.

¹⁸ Dit zijn basisbedragen en worden jaarlijks geïndexeerd. Voor aanslagjaar 2008 (om de belastingen op de inkomsten van 2007 te berekenen) zijn de geïndexeerde maxima 4 270 EUR en 800 EUR respectievelijk voor wagens met een uitstoot onder 105 g/km en tussen 105 en 115 g/km. Voor aanslagjaar 2007 bedragen de geïndexeerde bedragen respectievelijk 4 190 EUR en 790 EUR (Emis, 2007)

¹⁹ Dit wil zeggen dat er slechts een beperkt aantal spelers op de markt aanwezig is, die elk een vrij grote marktmacht bezitten en een invloed op de prijs kunnen uitoefenen. Deze spelers trachten hun product te differentiëren ten opzichte van de rest. (Begg, Fischer en Dornbusch, 2003)

2.3.2.4 Belastingen of subsidies

Wanneer bekeken wordt welke methode nu het beste is om externe kosten – en dan vooral de externe milieukosten – te internaliseren, namelijk het gebruik van belastingen of van subsidies, moet allereerst worden opgemerkt dat er verschillende soorten belastingen zijn. Vaste belastingen en brandstofbelastingen kunnen op verschillende manieren worden toegepast. Brandstofbelastingen kunnen namelijk zoals hierboven vermeld niet goed gedifferentieerd worden naar plaats en tijd. Via deze belastingen kan er dus geen onderscheid gemaakt worden tussen plaatsen met een hoog congestieniveau en regio's waar het minder druk is. Bij het beoordelen van een beslissing moet rekening gehouden worden met het mogelijke welvaartsverlies. Een bespreking van het welvaartsverlies is opgenomen in bijlage 5. Zoals uit deze en de volgende paragraaf zal blijken kunnen maatregelen die zorgen voor een verhoging van de taksen op het transport per personenwagen leiden tot een daling van de CO₂-emissies en een stijging van de welvaartswinst. Maatregelen die ervoor zorgen dat de overheidsinkomsten afnemen, hebben een welvaartskost.

Als het "vervuiler betaalt principe" toegepast wordt, verdienen (brandstof)belastingen de voorkeur. Wie meer rijdt, moet meer betalen. Wie vervuult, moet financieel verantwoordelijk gehouden worden voor de kosten en schade aan de omgeving die hij veroorzaakt. Wanneer de overheid alle kosten van het wegverkeer op de gebruiker wil verhalen, zouden de verkeersbelastingen moeten verdrievoudigen, volgens De Ceuster (2004). De totale schade van een dieselveertuig en benzinevoertuig bedragen zoals eerder vermeld respectievelijk 259 EUR/Mm en 244 EUR/Mm, de belastingen 69 EUR/Mm en 116 EUR/Mm. Ook voor andere voertuigcategorieën is er een grote kloof. De externe kosten voor alle voertuigcategorieën samen zijn gemiddeld 273 EUR/Mm, de belastingen 86 EUR/Mm. Wanneer de overheid alle externe kosten van het verkeer dus wil verhalen op de vervuiler moeten de belastingen op het wegverkeer ongeveer verdrievoudigen. Deze belasting moet ook gedifferentieerd zijn naar plaats, tijdstip en voertuigtype aangezien de externe kosten bijvoorbeeld hoger liggen tijdens de spitsuren en in de steden. In die gevallen zou de belasting dus sterker moeten toenemen dan tijdens de daluren en buiten de steden. (Mayeres en Proost, 2004) Zoals hierboven vermeld staat, hebben brandstofbelastingen enkele belangrijke tekortkomingen; ze kunnen niet gedifferentieerd worden naar plaats en tijd. Via vaste belastingen kan bijvoorbeeld wel de belasting gedifferentieerd worden naargelang de emissiekenmerken van het voertuig. Wie meer vervuult, moet meer betalen. In België wil men stilaan naar het "gebruiker betaalt principe" evolueren. (Peeters, 2006) Dit principe uit zich in het wegvignet maar dat zal deze legislatuur toch geen ingang vinden na het bezoek van de Vlaamse minister-president Leterme aan zijn Nederlandse collega Balkenende, volgens de Kamer van Koophandel (VOKA, 2007). VOKA (2007) is wel van mening dat de belasting op het bezit van een wagen moet

vervangen worden door een complexer systeem dat het gebruik van de wagen belast in functie van het aantal afgelegde kilometers, de tijd en de plaats.

Als de keuze tussen beide opties gebaseerd wordt op het sociale aspect, moet er eerder geopteerd worden voor de subsidies voor vermeden externe kosten omdat subsidies uit alle belastingen, dus ook belastingen op inkomen, afkomstig zijn en de rijken dus relatief meer betalen. Hierdoor vindt er een herverdeling van rijk naar arm plaats. Het feit dat subsidies gefinancierd moeten worden pleit tegelijk ook tegen het gebruik van subsidies omdat de financiering zelf bijkomende welvaartskosten impliceert en dus leidt tot een welvaartsverlies. Als de subsidie niet wordt gecompenseerd door belastingen, zullen de overheidsinkomsten – en bijgevolg het overheidsbudget – dalen en er dus besparingen moeten gebeuren. (Van Herbruggen en Proost, 2002) Er zal dan gesnoeid worden in de overheidsgelden op andere gebieden, waardoor er een welvaartsverlies optreedt. Ook hogere belastingen leiden tot een welvaartsverlies. Belastingen op het inkomen bijvoorbeeld verminderen de werkgelegenheid. Ook financiering door het bedrijfsleven zorgt voor minder werkgelegenheid door de invloed hiervan op de onderhandelingen tussen werkgevers en vakbonden. Subsidies gefinancierd door lagere sociale uitkeringen zijn ronduit nadelig voor de laagste inkomensklassen. In dat geval opteert men dus beter voor het gebruik van belastingen. Mayeres en Proost (2004) vermelden dat wanneer de subsidies daarentegen gesubsidieerd worden door hogere brandstofbelastingen of rekeningrijden, de armste groep erop vooruitgaat. Dit is dus een sociale maatregel. Wanneer de prijs door de overheid gelijk gesteld wordt aan de marginale sociale kost, heeft dit een welvaartsverhoging tot gevolg wanneer de extra overheidsinkomsten gebruikt worden voor een verlaging van de arbeidsbelasting of voor een verhoging van de sociale zekerheid.

Voor het criterium concurrentievermogen zou het subsidiëren van vermeden externe kosten de bovenhand halen. Dit zou namelijk het technologische onderzoek naar alternatieve brandstoffen stimuleren. Zo kan België misschien meer concurrentieel worden. Het is ook belangrijk om nieuwe technieken te subsidiëren omdat ze zo goedkoper worden en meer gebruikt worden. Zo wordt er een toekomstvisie verwezenlijkt waarin de olieprijs blijven stijgen en de technologieprijzen dalen. Ook voor de transgenerationale solidariteit zijn subsidies belangrijk. België kan daarenboven op die manier minder afhankelijk worden van andere landen.

Wanneer er rekening mee gehouden wordt dat in België de mogelijkheid van brandstoftoerisme bestaat, kan de overheid beter haar toevlucht nemen tot subsidies dan tot hoge belastingen op de brandstof. De hoge belastingen zouden bedrijven en burgers gewoon aanzetten om in het buitenland te gaan tanken. De Borger en Proost (2006) halen aan dat belastingen voor verstoringen op de arbeidsmarkt kunnen zorgen, omdat die het arbeidsaanbod kunnen verlagen. De verklaring hiervoor is dat de netto-vergoeding voor arbeid lager komt te liggen voor de

werknemer door het duurdere pendelvervoer. Dit argument pleit dan in het voordeel van het gebruik van subsidies.

Om de uitdaging van het aanpakken van de milieuproblemen aan te gaan is een multidisciplinaire aanpak nodig. Het is nodig de interacties tussen de verschillende aspecten van het verkeer goed te kennen. Enkel nieuwe wegen, of enkel hogere brandstofprijzen zullen het probleem niet oplossen. Er is een integrale aanpak nodig, met zowel aandrijftechnische, wetgevende, psychologische als socio-economische aspecten. (Krause, 2003; Van Mierlo et al., 2006; De Borger en Proost, 2006; Wets, 2006) Otto, Löschel en Reilly (2006) halen in dit verband aan dat volgens hen een combinatie van subsidies voor onderzoek en ontwikkeling naar nieuwe technieken en opgelegde beperkingen aan het CO₂-verbruik een zeer kosten-effectief klimaatbeleid vormt. Bovendien, zo schrijven de auteurs, kunnen de CO₂-beperkingen best gedifferentieerd worden naar intensieve versus minder intensieve sectoren. Deze benadering is meer kosten-effectief dan een uniforme CO₂-prijs over alle sectoren. Op die manier wordt de groei in de CO₂-intensieve sectoren afgeremd ten voordele van een sterkere groei in de minder intensieve sectoren. De overheid werkt eraan om psychologisch in te spelen op de bevolking via informatiebrochures om zo een mentaliteitswijziging te bewerkstelligen. Enkele bijkomende maatregelen die zouden kunnen gebruikt worden en hun geschatte impact op de emissies worden in de volgende paragraaf weergegeven.

2.3.2.5 Andere maatregelen

De Vlieger et al. (2001) leiden uit hun studie een aantal mogelijke beleidsopties af om de CO₂-emissies te verminderen. De beleidsopties werden getoetst aan enkele criteria zoals maatschappelijke wenselijkheid, impact op de daling van schadelijke uitlaatgassen en economische kost voor de implementatie ervan. De beleidsopties die goed scoorden op de schaal van criteria zijn: versnelde introductie van milieuvriendelijke conventionele voertuigen, verbeterde inspectie en onderhoud van bestaande voertuigen en het terugdringen van woon-werkverkeer door carpooling en telewerk. De versnelde vervanging van oude personenwagens door nieuwere scoort hier slecht. Nochtans is dat de oplossing die Martens (2006) van Febiac voorstelt. Hij pleit voor een zo snel mogelijke vernieuwing van het wagenpark omdat de nieuwere vormen van auto's minder belastend zijn voor het milieu door de strengere normen waaraan ze moeten voldoen. Het verschil tussen deze twee visies kan te wijten zijn aan het feit dat Martens in zijn verklaring niet zo veel rekening houdt met de politieke haalbaarheid en de kost van de implementatie van het voorstel, twee criteria waarop het voorstel in de studie niet goed scoort. Ook is de positieve impact van deze maatregel slechts van korte duur. Bovendien is de reductie van de schadelijke stoffen in de uitlaatgassen groter bij andere beleidsmaatregelen, waardoor die ook relatief aantrekkelijker worden. Dat een verjonging van het wagenpark op korte termijn toch wel zin heeft, wordt door Transport & Mobility Leuven (2006) aangeduid met de volgende cijfers: 25 % van de

benzinewagens voldeed in 2005 zelfs niet aan de Euro 1 norm. Deze wagens zijn verantwoordelijk voor 30 % van de uitstoot van NO_x en PM. Overigens, zo geeft het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2003) aan, kan het doorvoeren van een verjonging van het wagenpark leiden tot een vermindering van de externe kosten die kan oplopen tot 20 %. Deze maatregel werd door het Ministerie op korte termijn de beste bevonden, met de grootste impact op de emissies.

Een andere maatregel die werd onderzocht is het ombouwen van bestaande voertuigen naar milieuvriendelijkere vormen. Dit kan bijvoorbeeld door het bijkomend plaatsen van een uitlaatanbehandlingssysteem of het aanpassen van de motor naar een andere brandstof die lagere emissies veroorzaakt. Volgens het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2003) kan deze beleids optie emissie-reducties realiseren tot 50 %. In de rangschikking van De Vlieger et al. (2001) scoort deze beleids optie matig, maar de auteurs vermelden dat de optie geenszins uitgesloten mag worden. Eén van de randvoorwaarden om de conversie door te voeren is het subsidiëren ervan om de extra kost te overwinnen. Bovendien moet een certificatiesysteem worden ingevoerd om na te gaan of de technologie goed is en beantwoordt aan de emissiedoelstellingen. De introductie van milieuvriendelijke brandstoffen moet gestimuleerd worden.

Aangezien het effect van veroudering van wagens op de emissies aanzienlijk is, kan er ook geopteerd worden voor een betere inspectie en onderhoud. Dit wordt door De Vlieger et al. (2001) een goede maatregel genoemd. Enerzijds treedt deze veroudering op doordat componenten minder goed gaan presteren en anderzijds omdat er mankementen aan optreden.

Ook versnelde introductie van milieuvriendelijke voertuigen scoort zoals gezegd goed op de verschillende criteria van De Vlieger et al. (2001). Het invoeren van voertuigen die aan toekomstige normen voldoen, vindt slechts zeer langzaam de weg naar de markt. Dit is vooral te wijten aan de extra kost die de nieuwe technologie met zich meebrengt, volgens het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2003). De kost moet dus verlaagd worden zodat de nieuwe technologie ook werkelijk gebruikt wordt. Hier kan gebruik gemaakt worden van subsidies. Alternatieve brandstoffen kunnen bijvoorbeeld ook gestimuleerd worden door een verlaging van de accijnzen erop. De introductie van een alternatieve brandstof gaat gepaard met een aantal hinderpalen. (Van Mierlo, 2006; Ministerie Vlaamse Gemeenschap, 2003) Er is een te beperkt aanbod van voertuigen en brandstofinfrastructuur. De ondersteuning bij training, onderhoud en gebruik is te beperkt. De kostprijs is zoals vermeld te hoog en de gebruikersvoordelen zijn te klein.

Er moet wel opgemerkt worden dat wat de gebruiker als de meest kosteneffectieve maatregel ervaart, niet noodzakelijk ook de meest kosteneffectieve maatregel is. Van Herbruggen en Proost (2002) tonen in hun studie aan dat een consument de invoering van een brandstofnorm waaraan de wagens moeten voldoen een betere – meer kosteneffectieve – maatregel vinden dan een

brandstoftaksverhoging²⁰. In een vereenvoudigde transportmarkt zonder rekening te houden met externe effecten is de welvaartskost van een brandstofnorm 363 EUR/ton CO₂, die van een brandstoftaksverhoging bedraagt 326 EUR/ton CO₂. De consument ervaart echter kosten van slechts 84 EUR/ton CO₂ bij een brandstofnorm en voor hem heeft een brandstoftaksverhoging een kost van 1006 EUR/ton CO₂. Het feit dat consumenten rekening houden met de brandstof- en andere taksen die ze moeten betalen zorgt ervoor dat ze de maatschappelijke kosten van de maatregels verkeerd inschatten. Wanneer er echter wel rekening gehouden wordt met de externe effecten, blijkt uit dezelfde studie dat een brandstofnorm binnen een agglomeratie een welvaartskost van 88 EUR/ton CO₂ impliceert, buiten een agglomeratie is de kost 284 EUR/ton CO₂. De behaalde reductie van de externe effecten zal in realiteit wel kleiner zijn dan de berekende. Wanneer een brandstofnorm wordt ingevoerd, zal dit leiden tot een reductie van het autoverkeer op de Belgische wegen. Dit leidt tot een daling van de tijdskosten per km voor de overgebleven consumenten. Hierdoor zijn de behaalde reducties in de realiteit kleiner. Een brandstoftaksverhoging daarentegen brengt een welvaartswinst van 919 EUR/ton CO₂ met zich mee binnen de steden, en 44 EUR/ton CO₂ winst buiten de steden. Dit valt te verklaren omdat de consument langs de ene kant, bij de invoering van een hogere brandstoftaks, gaat overschakelen naar een andere technologie om zwaar belaste brandstof te vermijden. Bovendien gaat men minder rijden omdat het transport per wagen duurder wordt. Hierdoor worden de externe congestiekosten sterk verlaagd. Voor de stedelijke inwoners wordt de daling van de koopkracht door de aankoop van zuinigere auto's bijna volledig gecompenseerd door een afname van het tijdsverlies. Verder worden ook de emissies, geluidsoverlast en ongevallen verminderd. Brandstoftaksen, zo besluiten Van Herbruggen en Proost (2002) zijn een kosteneffectievere maatregel dan het verplichten van zuinigere wagens, omdat de transportvraag in het eerste geval sterker zal afnemen door de grotere toename van de vervoerskosten. Als gevolg van de hogere brandstoftaksen zal er toch meer geïnvesteerd worden in zuinigere technologieën. Dit leidt echter wel tot inefficiënties omdat de bespaarde brandstofkosten de meerkost van deze investeringen niet kunnen compenseren. In tabel 6 worden deze gegevens samengevat.

Tabel 6: Brandstofnorm versus brandstoftaksverhoging

	Brandstofnorm (EUR/ton CO₂)	Brandstoftaksverhoging (EUR/ton CO₂)
Welvaartskost (geen externe effecten)	363	326
Ervaren kost consument	84	1006
Welvaartskost (externe effecten, agglomeratie)	88	-919
Welvaartskost (externe effecten, buiten stad)	284	-44

²⁰ Een brandstofbelasting is zoals gezegd geen goede maatregel, want ze kunnen onvoldoende gedifferentieerd worden. Deze maatregel werkt slechts zeer indirect in op de externe vervuilingkosten. Ze houden enkel rekening met het verbruik van de wagen en niet met ander vervuilende karakteristieken van de wagen zoals de aanwezigheid van een katalysator. (De Borger, Kerstens en Van Dender, 1997)

Nog beter dan een brandstoftaks is de invoering van een kilometerheffing volgens de auteurs. De welvaartswinst komt hier neer op 1 370 EUR/ton CO₂, wat meer dan het zeventvoudige is van de welvaartswinst per ton CO₂ bij een verhoging van de brandstoftaks. Dit kan verklaard worden doordat een kilometerheffing de vervoerskost voor weggebruikers doet stijgen waardoor het autoverkeer vermindert en dus ook de externe congestie-, ongevals- en milieukosten. De kilometerheffingen moeten ook betaald worden, maar deze financiering gaat niet noodzakelijk gepaard met een welvaarts-kost, omdat de overheid deze extra inkomsten nuttig kan aanwenden in andere sectoren. Dit geldt ook voor brandstoftaksen, maar consumenten zullen door de verhoogde brandstoftaksen ook geneigd zijn om zuinigere wagens te gebruiken. De brandstofkosten en externe kosten die bespaard worden door een zuinigere wagen te gebruiken wegen echter niet op tegen de meerkost van de zuinige wagens. Hierdoor wordt het welvaartsverhogend effect van de daling van de transportvraag deels tenietgedaan. In de praktijk zal er bij de invoering van de kilometerheffing ook een overgang zijn naar zuinigere wagens door de afspraak met de autoconstructeurs om het brandstofverbruik te beperken. Deze investering blijft echter kleiner dan die bij de brandstofnorm omdat bij een brandstofnorm nòg zuinigere wagens zouden moeten gebruikt worden om de externe kosten te verminderen. De kost van een reductie van het brandstofverbruik neemt namelijk meer dan evenredig toe met de grootte van de reductie.

Crals, Keppens en Vereeck (2006) zien in de invoering van een systeem met verhandelbare brandstofrechten een oplossing voor de vermindering van het gebruik van fossiele brandstoffen. Het is een systeem waarbij er een quotum wordt gesteld op het maximaal toegelaten aantal rechten in België en waarbij deze rechten verhandeld worden. Het is bijgevolg een soort rantsoeneringsstelsel. De auteurs noemen dit een effectieve, efficiënte en sociale maatregel. Er wordt niet meer brandstof verbruikt dan toegelaten, de gebruiker van brandstof moet betalen, maar tevens wordt ook de niet-gebruiker en dus de niet-vervuiler beloond. Volgens de auteurs zet dit bovendien mensen sneller aan tot het overstappen naar brandstofefficiëntere voertuigen. Hierdoor wordt de ontwikkeling van milieuvriendelijke voertuigen dus gestimuleerd.

Om dit hoofdstuk over de energieproblematiek te besluiten, kan er nog aangehaald worden dat het veel kosteneffectiever is om de emissies te verminderen in andere sectoren dan de transportsector. (De Borger, Proost en Van Dender, 1997; Mayeres, Proost en Van Dender, 1997) Er kunnen beter efficiëntere technologieën geïntroduceerd worden in andere sectoren zoals de elektriciteitssector of industrie. In de transportsector worden nu al de goedkopere technieken voor het reduceren van het brandstofgebruik toegepast omwille van de hoge brandstoftaksen. Om het brandstofgebruik verder te reduceren, zullen duurere technieken moeten geïntroduceerd worden. De bespaarde brandstofkosten zullen deze meerkost niet compenseren. De brandstoftaksen in de elektriciteitssector en de industrie zijn lager, waardoor er minder brandstofbesparende inspanningen zijn geleverd dan in de transportsector. De sector heeft er namelijk slechts belang bij om te investeren in energiezuinigere technieken als de kost van dergelijke technieken per liter

brandstof kleiner is dan of gelijk is aan de prijs van een liter brandstof. Verdere inspanningen kunnen nog gerealiseerd worden tegen lagere kosten. (Van Herbruggen en Proost, 2002; Mayeres en Proost 2004; De Borger en Proost, 2006) Hoewel in andere sectoren kosteneffectievere maatregelen kunnen ingevoerd worden, en hoewel er ook kosteneffectievere maatregelen bestaan voor het internaliseren van de externe kosten dan de ontwikkeling van nieuwe technologieën, raken de fossiele brandstoffen zoals gezegd uitgeput, en kan het ontwikkelen van nieuwe brandstoftechnologieën ons land een belangrijk concurrentievoordeel bezorgen. Het ontwikkelen van nieuwe aandrijfvormen is bijgevolg toch belangrijk, daarom is hoofdstuk 4, na een bespreking van het Kyoto-protocol in hoofdstuk 3, aan de nieuwe aandrijfvormen voor auto's gewijd.

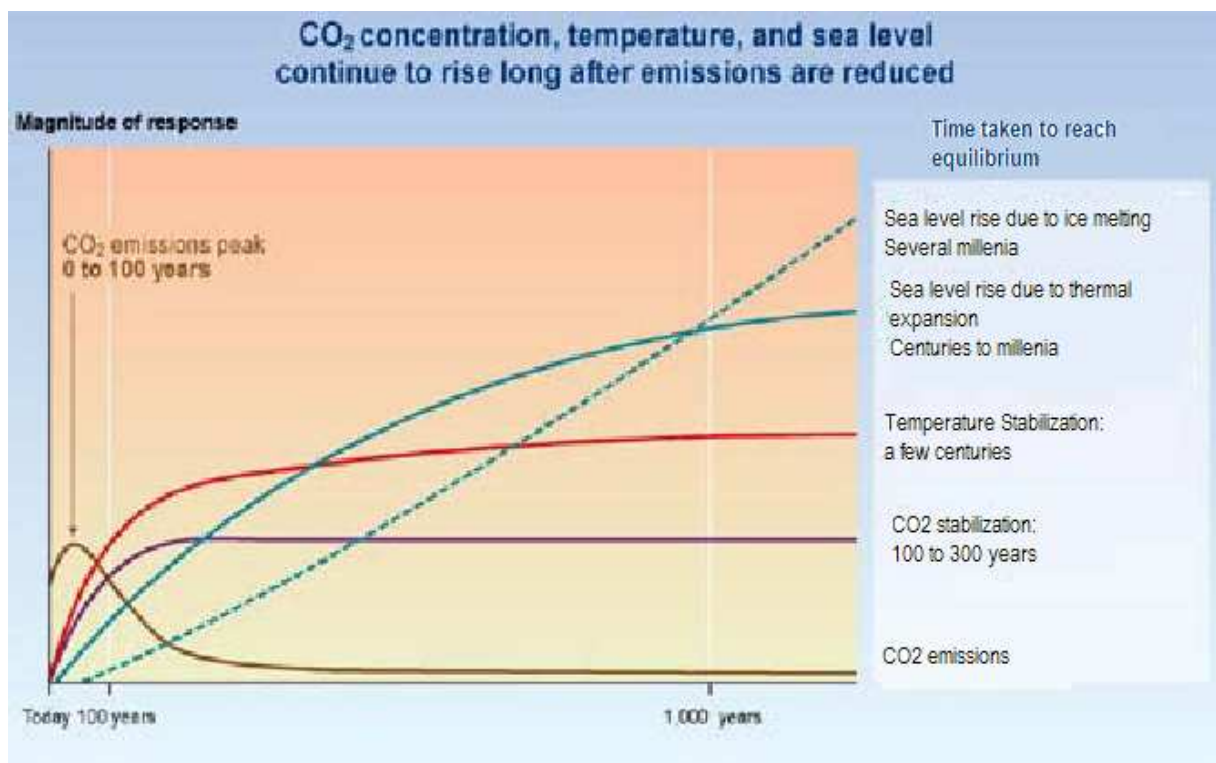
3 HET KYOTO-PROTOCOL

**“Pak iets aan voordat het een probleem is. Schep orde voordat de chaos intreedt.”
(Lao-Tse)**

Om te trachten iets te ondernemen tegen het broeikaseffect en de opwarming van de aarde verbonden verschillende landen zich ertoe de uitstoot van 6 broeikasgassen te beperken. Hiertoe ondertekenden ze het Kyoto-protocol.

3.1 Inhoud van het Protocol

CO₂ komt vrij bij de verbranding van fossiele brandstoffen en zorgt, nadat het wordt uitgestoten, met een vertraging van enkele tientallen jaren, voor een opwarming van de aarde voor de volgende honderden jaren. (Eyckmans en Proost, 1998) Dit wordt in figuur 9 weergegeven. De mogelijke gevolgen van een dergelijke opwarming werden al besproken in hoofdstuk 1. Het mondiale aspect van de opwarming van de aarde wijst op het belang van een internationaal akkoord ter beperking van de broeikasgassen. Als internationaal antwoord op de klimaatsveranderingen werd in december 1997 het Kyoto-protocol in consensus aanvaard op de derde Conference of Parties. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)



**Figuur 9: Evolutie van de CO₂-concentratie, temperatuur en zeeniveau
(CEESE, 2004: 54)**

Het Protocol wil de internationale gemeenschap dichter bij het uiteindelijke doel van de Conventie brengen, namelijk het voorkomen van "*dangerous anthropogenic interference with the climate system*" [*gevaarlijke menselijke inmenging in het klimaatsysteem*] (Europese Commissie, 2006). Het niveau waarop de gevaarlijke verstoring van het klimaat wordt voorkomen, wordt niet nader bepaald. Met de Conventie wordt de United Nations Framework Convention on Climate Change, of kortweg de UNFCCC, bedoeld. (United Nations, 1998) Deze werd in 1992 opgericht in Rio de Janeiro, waar toen al enkele bepalingen werden vastgelegd in een raamakkoord. In 1994 werd dit verdrag van kracht, schrijven Eyckmans en Proost (1998). De ondertekenaars van het raamverdrag verbonden zich ertoe om van hun broeikasgasemissies een inventaris op te maken en nationale beleidsplannen op te stellen om de uitstoot van broeikasgassen te beperken. Bovendien moeten ze bijdragen leveren aan het wetenschappelijk onderzoek in verband met de klimaatsverandering, de bevolking sensibiliseren over de klimaatverandering met campagnes en regelmatig opvolgingsconferenties bijwonen, de zogenaamde "Conferences of Parties" of COP's.

Het Kyoto-protocol gaat nog een stap verder en legt kwantitatieve beperkingen op. Het schrijft voor dat de deelnemende landen in de periode 2008 tot 2012 hun gezamenlijke emissies van broeikasgassen terugbrengen tot minimum 5 % onder het niveau van 1990. Hierbij wordt rekening gehouden met de economische draagkracht van een land (United Nations, 1998). De landen die een kwantitatieve beperking hebben aangegaan, noemt men Annex B-landen. Dit zijn dezelfde als de Annex I-landen, de naties die deel uitmaken van de Conventie, gecorrigeerd voor de landen die het Kyoto-protocol niet geratificeerd hebben. Annex II-landen, zijn de naties die lid waren van de OECD (OESO, Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling) in 1992. Om het onderscheid wat te verduidelijken kan er een overzicht van de Annex I-, Annex II- en Annex B-landen worden teruggevonden in de bijlage 6. Verder wordt, in tegenstelling tot in het raamverdrag, nu over 6 broeikasgassen gesproken, en niet meer enkel over CO₂. De 6 broeikasgassen die verminderd moeten worden, zijn zoals eerder vermeld: CO₂ (koolstofdioxide), één van de belangrijkste broeikasgassen wegens de lange verblijftijd in de atmosfeer, N₂O (beter bekend als lachgas), CH₄ of methaan en fluorverbindingen, namelijk PFK's, HFK's en SF₆. Jensen en Thelle (2001) geven het belang aan van een zogenaamde "mand" van broeikasgassen, waarbij de uitstoot van 6 gassen moet verminderd worden en niet enkel die van CO₂. Elk land krijgt één quotum voor de 6 gassen samen en is op die manier flexibel om zelf de emissies van elk gas te sturen en te reduceren. De auteurs tonen aan dat de kosten van de vermindering van de uitstoot hierdoor voor de Westerse landen met 20 tot zelfs 35 % lager komen te liggen. Dit is deels te verklaren omdat de niet-CO₂-gassen tegen lagere kost kunnen gereduceerd worden, terwijl de opties om CO₂ te doen dalen heel wat hoger zijn. Een belangrijke assumptie bij hun onderzoek is wel dat er ongelimiteerd gebruik mag zijn van emissiehandel. Dit onderwerp wordt verder nog besproken onder 3.2.3 Emission Trading.

De 6 broeikasgassen worden uitgedrukt in CO₂-equivalenten²¹, rekening houdend met de klimaateffecten die de verschillende gassen hebben over een tijdshorizon van 100 jaar. Deze methode heeft te kampen met verschillende kritieken, omdat de tijdshorizon van 100 jaar arbitrair is. Wanneer gekozen wordt voor een langere tijdshorizon zouden korter levende gassen zoals methaan een hogere Global Warming Potential²² (GWP) krijgen. (Jensen en Thelle, 2001) Ze zijn bovendien uitgedrukt als een percentage ten opzichte van de emissies van 1990. Ter volledigheid kan hier vermeld worden dat enkele Economies in Transition (EIT's) een ander basisjaar zijn overeengekomen.²³ Voor de fluorhoudende gassen kunnen de Annex I-landen 1995 of 1990 als basisjaar nemen, naargelang in welk jaar de emissies van die gassen het hoogst waren. Door de grootste emissiewaarde te nemen, worden de inspanningen tot reductie van de uitstoot van de fluorhoudende gassen kleiner. (Grubb, 2000) Van alle lidstaten van de Europese Unie hebben enkel Frankrijk en Finland 1990 als basisjaar gekozen. (EEA, 2005)

Het Kyoto-protocol trad in werking toen de parlementen van 55 landen, die samen verantwoordelijk zijn voor 55 % van de uitstoot van broeikasgassen in 1990 het Protocol hebben geratificeerd. De Europese Unie, die toen uit 15 lidstaten bestond, bekrachtigde het Protocol in 2002 zoals de Europese Commissie (2006) meldt. De Verenigde Staten hebben het verdrag niet ondertekend omdat president Bush junior vreesde voor schade aan de Amerikaanse economie. *"The Kyoto treaty would have wrecked our economy, if I can be blunt."* [Het Kyoto verdrag zou onze economie gesloopt hebben, als ik zo bot mag zijn.] (President Bush in een interview met ITV, geciteerd door Thulkens en Thulkens, 2006) Deze "schade" is tweeledig. Enerzijds krijgen de ontwikkelingslanden geen emissiebeperkingen opgelegd in het Protocol, wat nadelig is voor de economie van de Verenigde Staten in vergelijking met bijvoorbeeld China, India en Brazilië. Anderzijds zou een uitstootvermindering van 7 %, zoals het Kyoto-protocol voorschrijft, te kostelijk zijn voor de Amerikaanse economie, zo schrijven Thulkens en Thulkens (2006). Na onderzoek komen de auteurs echter tot de vaststelling dat de raming van de kosten voor de Verenigde Staten, die het land ertoe aanzette het Protocol af te wijzen, veel te hoog was. Ze was zelfs hoger dan de hoogst beschikbare schatting. Bovendien was de kostenraming niet vergezeld van de nodige informatie om de gegevens juist te interpreteren. Het is echter onwaarschijnlijk dat de VS onder het huidige presidentschap sterk van politiek zullen veranderen aangaande de klimaatveranderingen. De Verenigde Staten, met ongeveer 5 % van de wereldbevolking, zijn nochtans verantwoordelijk voor zowat 25 % van de totale uitstoot van broeikasgassen. (Jones, 2004) Al Gore, de man die de presidentsverkiezingen in 2000 verloor tegen Bush, wil de wereld nu

²¹ 1g CH₄ is equivalent met 4g CO₂. 1g N₂O komt overeen met 310 g CO₂. (Emis, 2007)

²² De GWP geeft de totale impact over de tijd weer die het gevolg is van een extra eenheid broeikasgas in de atmosfeer. Deze waarde houdt zowel rekening met de hoeveelheid die van een bepaald gas in de atmosfeer wordt gebracht als met de stralingsintensiteit. Deze maatstaf wordt gebruikt om de verschillende broeikasgassen te kunnen vergelijken. CO₂ bijvoorbeeld heeft een lage stralingsintensiteit, maar door de grote hoeveelheid die jaarlijks wordt uitgestoten en de lange verblijftijd, heeft CO₂ een hoge GWP factor. Fluorhoudende gassen hebben ook een hoge GWP door hun hoge stralingsintensiteit. (Tackle, 1997)

²³ Hongarije neemt als basis een gemiddelde van de uitstoot van de jaren 1985-1987. Polen gebruikt 1988 als basisjaar en Slovenië vergelijkt met 1986. Malta en Cyprus hebben geen reductiedoelstellingen. (EEA, 2005)

wakker schudden met "An inconvenient Truth", een film over de opwarming van de aarde, een problematiek waarmee hij zich al jaren bezighoudt. Misschien komt er dus toch nog verandering in de houding van de Verenigde Staten tegenover het broeikaseffect. Ongeveer 240 grote Amerikaanse steden hebben de Kyoto-akkoorden zelf ondertekend, omdat ze het niet eens zijn met het beleid van de Verenigde Staten hieromtrent. Otto, Löschel en Reilly (2006) vermelden ook dat, hoewel de VS uit het Kyoto-protocol zijn gestapt, ze toch een technologisch beleid willen aannemen, met R&D (Research and Development) of Onderzoek en Ontwikkeling als alternatief. Ze redeneren dat zonder nieuwe technologieën de emissiequota sowieso niet haalbaar zijn.

In 2004, 7 jaar na de overeenkomst in Kyoto, werd het Protocol van kracht door de ondertekening van Rusland, toen eindelijk aan de dubbele voorwaarde voor de inwerkingtreding van het Protocol was voldaan. 90 dagen later, in februari 2005, trad het Protocol officieel in werking.

De Annex I-landen moeten het initiatief nemen in de emissiebeperkingen, terwijl de niet-Annex I-landen geen quota opgelegd kregen. In het rapport van het Centre d'Etudes Economiques et Sociales de l'Environnement (CEESE) wordt vermeld dat de ontwikkelingslanden toch steeds meer betrokken worden bij de strijd tegen de klimaatsverandering, bijvoorbeeld door de flexibele mechanismen, die verder nog worden besproken (CEESE, 2004). In de akkoorden van Marrakech²⁴ wordt ook gesproken over een versterking van hun capaciteiten, overdracht van technologie en hulpfondsen. Maar het is nodig om deze betrokkenheid nog te vergroten. De niet-Annex I-landen moeten zich eveneens inzetten om de uitstoot van broeikasgassen te doen dalen.

De landen van de Europese Unie willen hun uitstoot tegen 2012 doen dalen met 8 % ten opzichte van de uitstoot van 1990, zoals blijkt uit tabel 7. Artikel 4 van het Kyoto-protocol maakt het mogelijk dat landen onderling een akkoord mogen sluiten om hun emissiebeperkingen onder elkaar te herverdelen. (United Nations, 1998) Dit hebben de Europese lidstaten ook toegepast, waardoor België een emissiebeperking van 7,5 % op zich heeft genomen. Deze constructie van herverdelingen noemt men een Bubble. Het principe van de Bubble wordt nog verder besproken onder 3.2.4 Bubble. In tegenstelling tot de meeste landen die beperkingen opgelegd kregen zijn er landen die hun uitstoot mogen laten stijgen ten opzichte van 1990. Portugal mag zijn emissies zelfs met 27 % laten toenemen. Een overzicht van de emissiebeperkingen (als percentage ten opzichte van 1990, na toepassing van het principe van de Bubble) voor een aantal Europese landen wordt weergegeven in tabel 7 op de volgende bladzijde. De absolute cijfers van de CO₂-quota zijn uitgedrukt in Mton.

²⁴ In Marrakech vond de zevende Conference of Parties plaats in 2001. Op deze bijeenkomst namen de partijen heel wat beslissingen over de specifieke uitwerking van de flexibele mechanismen. (UNFCCC, 2006)

Tabel 7: Verdeling van de emissies in Europa

land	CO ₂ emissies 1990	verschil 90-95	Kyoto beperking na bubble
België	109.33	+7.13	-7.5
Denemarken	53.25	+13.67	-21.0
Duitsland	982.33	-9.97	-21.0
Griekenland	72.46	+5.74	+25.0
Spanje	215.92	+14.38	+15.0
Frankrijk	378.03	-4.24	0
Ierland	33.24	+4.87	+13.0
Italië	409.29	+3.55	-6.5
Luxemburg	10.86	-17.68	-28.0
Nederland	161.50	+10.73	-6.0
Oostenrijk	59.39	+0.99	-13.0
Portugal	41.58	+22.37	+27.0
Finland	53.68	+1.34	0
Zweden	52.77	+6.35	+4.0
Verenigd Koninkrijk	584.05	-3.29	-12.5
	3217.7	-1.16	-8.00

Bron: Eyckmans (1998: 8)

Jensen en Thelle (2001) geven aan dat in sommige landen, waaronder Rusland, wordt verwacht dat de emissies in de periode 2008-2012 lager zullen zijn dan de quota die opgenomen zijn in het Kyoto-protocol. Dit verschil wordt ook wel "Hot Air" genoemd, en kan geruild worden met andere Annex B-landen. Zoals de FRDO (2006) vermeldt, wordt er gevreesd dat deze landen de markt zullen overspoelen met hun overtollige emissierechten die anders niet zouden worden gebruikt en dat andere naties deze emissierechten liever zouden kopen dan zelf echte reductie-inspanningen te leveren omdat die aankoop goedkoper is. Als het Protocol echter niet in deze mogelijkheid had voorzien, zouden verschillende Annex I-landen niet de hoge uitstootreducties hebben aanvaard die ze nu wel op zich hebben genomen.

3.2 Flexibiliteitmechanismen

Om de totale kosten die nodig zijn om de emissiereducties te verwezenlijken te optimaliseren, definieert het Kyoto-protocol drie innovatieve flexibiliteitmechanismen²⁵. Men wil dus met een bepaalde kost zoveel mogelijk uitstootdaling in de wereld. Deze drie mechanismen maken het voor de landen mogelijk om kosteneffectieve methodes te gebruiken om de uitstoot te doen dalen in eigen land of in andere landen. De kost om de emissies te beperken varieert sterk van land tot land, maar de opbrengst voor de atmosfeer blijft dezelfde, waar de reducties ook gerealiseerd worden. (UNFCCC, 2006)

3.2.1 Clean Development Mechanism (CDM)

In artikel 12 van het Protocol wordt het Clean Development Mechanism of CDM gedefinieerd. Het mechanisme laat toe dat Annex I-landen projecten implementeren die de emissies van niet-Annex I-landen verlagen. Ook absorptie van koolstof via bebossing, ontbossing en herbebossing is mogelijk. In ruil voor dergelijke maatregelen worden Emissie Reductie Eenheden (Emission Reduction Units) toegekend, die bijdragen tot het uitstootquotum van het land dat de projecten realiseert. Een Emissie Reductie Eenheid betekent dat er één ton CO₂-equivalenten minder is uitgestoten. (UNFCCC, 2006) Dit mechanisme is het meest innoverend in die zin dat het het enige is dat de ontwikkelingslanden, aan welke geen reductiequota zijn opgelegd, betreft in de strijd tegen de opwarming van de aarde. Deze landen worden zo geholpen om aan duurzame ontwikkeling te doen en op die manier bij te dragen tot het uiteindelijke doel van de Conventie. Een voordeel van deze methode is dat er via dit mechanisme nieuwe investeringen terecht komen in de ontwikkelingslanden en dat de overdracht van technologie wordt versneld. Door de verspreiding van de technologie in de ontwikkelingslanden worden nog meer CO₂-verminderingen gerealiseerd. Het voordeel voor de industrielanden bestaat erin dat ze hun reducties op een goedkopere manier kunnen realiseren. (UNFCCC, 2006)

Eyckmans (1998) haalt aan dat het wel nadelig is dat er een grote administratieve kost aan dergelijke projecten verbonden is doordat het noodzakelijk is de emissies te vergelijken die uitgestoten worden wanneer het project wordt gerealiseerd met de emissies die worden uitgestoten zonder het project. Bovendien is het een bilateraal handelsmechanisme, net zoals Joint Implementation – dat in het volgende punt aan bod komt – waardoor niet alle

²⁵ Om gebruik te mogen maken van de flexibele mechanismen moeten de partijen aan enkele voorwaarden ("Eligibility requirements") voldoen. Ze moeten het Protocol hebben geratificeerd, hun doelstelling in CO₂-equivalenten hebben uitgedrukt, een nationaal systeem hebben om uitstoot te schatten en om de emissiereducties te meten. Bovendien moeten de landen een boekhouding bijhouden waarin ze weergeven hoe de emissierechten bewegen, hoeveel ze er met andere woorden bekomen uit JI- en CDM-projecten. Ook moeten de landen voldoen aan hun rapportageplicht over de emissies en hun reducties. (UNFCCC, 2006)

handelsmogelijkheden worden uitgeput. Daarnaast hebben de betrokken partijen er alle belang bij om de verwezenlijkte emissiedalingen te overdrijven. Een ontwikkelingsland heeft namelijk geen enkele emissieverplichting aangegaan en wil dus liefst een baseline zonder project die zoveel mogelijk emissies bevat. Voor het Westers bedrijf komt dit goed uit omdat ze zo zoveel mogelijk Emission Reduction Units kunnen verdienen.

CDM-projecten moeten steeds goedgekeurd worden door de betrokken partijen, de "execution board" en door een externe onafhankelijke derde partij, de "designated operational entity" (DOE), die het project moet verifiëren en certifiëren. (Emis, 2006) Om goedgekeurd te worden is het noodzakelijk dat de projecten bijdragen aan de duurzame ontwikkeling, staat te lezen in CEESSE (2004). Een sterke daling van broeikasgassen impliceert echter niet altijd dat er ook aan duurzame ontwikkeling wordt gedaan, hoewel de meeste emissiereducerende programma's wel een reeks voordelen voor duurzame ontwikkeling met zich meebrengen. Een mooi overzicht van wat er allemaal onder duurzame ontwikkeling valt, is opgenomen in bijlage 7.

Het is essentieel dat de ontwikkelingslanden naar de toekomst toe overtuigd worden om deel te nemen aan internationale milieuakkoorden. Deze landen hebben de grootste te verwachten schade bij de opwarming van de aarde. Afrika zal het zwaar te verduren krijgen en er zullen nog meer mensen naar Europa willen migreren dan nu. (Janssens en Huybrechts, geciteerd door Draulans, 2006) Het aandeel van de Annex I-landen in de totale werelduitstoot van CO₂ bedroeg in 1990 nog 46 %, maar schattingen tonen aan dat hun aandeel zou verkleinen tot nog slechts 20 % naarmate de grote ontwikkelingslanden meer en meer gaan produceren en meer CO₂ gaan uitstoten. In dit opzicht is het Kyoto-protocol zeker belangrijk door de ervaring over internationale samenwerking dat het met zich meebrengt. (Eyckmans, 1998)

3.2.2 Joint Implementation (JI)

Joint Implementation of JI wordt in artikel 6 van het Protocol uiteengezet. (United Nations, 1998) Een Annex I-land kan gebruik maken van dit mechanisme om verlagingen van de broeikasgasuitstoot te verwezenlijken in een ander Annex I-land, dat zelf een quotum heeft opgelegd gekregen onder het Kyoto-protocol. Ook hiervoor krijgt het land dat de projecten realiseert Emissie Reductie Eenheden toegewezen. Eyckmans (1998) vermeldt dat het land waar de reducties worden gerealiseerd deze vermindering niet van zijn Kyoto-verplichting mag aftrekken, enkel het land dat het emissiebesparende project uitvoert, mag de gerealiseerde daling van zijn opgelegde beperking aftrekken. Dit is ook vanzelfsprekend, anders wordt de reductiebesparing dubbel geteld.

Verder somt de auteur enkele nadelen op van het JI mechanisme. Een bilateraal mechanisme is minder efficiënt dan een normaal marktsysteem zoals bijvoorbeeld Emissions Trading, wat in de volgende paragraaf verder wordt besproken. Joint Implementation werkt slechts correct als in beide landen de emissiereductieverplichtingen al effectief vertaald zijn tot op het bedrijfsniveau. Anders zal geen enkel bedrijf geïnteresseerd zijn in een JI-project. Bovendien is er een grote administratieve kost aan het mechanisme verbonden omdat voor elk project moet gemeten worden hoeveel emissies er minder uitgestoten worden tegenover de situatie voor het project.

3.2.3 Emission Trading (ET)

Indien een land een grotere emissieverlaging realiseert dan wat het opgelegd kreeg, heeft het een overschot op zijn toegelaten quotum. Emission Trading of Handel in Emissierechten laat toe dit overschot te verkopen aan landen die denken dat ze meer zullen uitstoten dan wat het Protocol hun toelaat. Dit mechanisme wordt in artikel 17 van het Protocol beschreven. (UNFCCC, 2006) Het systeem zorgt ervoor dat inspanningen op een efficiëntere, goedkopere manier kunnen gebeuren. Landen die op een goedkope wijze meer kunnen reduceren dan ze moeten, zullen door dit mechanisme ook meer geneigd zijn dit te doen, omdat ze het overschot kunnen verkopen. Het gemeenschappelijke resultaat is hetzelfde, maar de totale kosten liggen lager.

De Europese Unie heeft in 2005 een systeem ingevoerd dat emissiehandel tussen bedrijven organiseert via een richtlijn (2003/87/EG). Deze richtlijn helpt ondernemingen om hun emissienormen op een zo goedkoop mogelijke manier te bereiken en met een zo gering mogelijke teruggang van economische ontwikkeling en werkgelegenheid als gevolg. De ondernemingen hebben de keuze tussen investeringen die hun uitstoot verminderen, de aanschaf van emissierechten op de Europese markt, of een combinatie van beide. Op die manier kunnen ze hun kosten optimaliseren door een optimale mix van beide methodes te gebruiken op basis van de investeringskosten en de prijs van de emissierechten. (klimaat.be, 2006) De Europese emissiehandel verloopt volgens het "cap and trade" systeem, wat inhoudt dat de emissies geplafonneerd en de rechten verhandeld worden. De deelnemende installaties krijgen een vaste hoeveelheid rechten toegewezen en ze mogen enkel meer uitstoten als ze op de markt rechten aankopen. Voor de initiële hoeveelheden die elke installatie krijgt toegewezen, moeten alle lidstaten een nationaal toewijzingsplan voorleggen aan de Europese Commissie.

In België zijn de 3 gewesten bevoegd voor de meeste installaties. Enkel de veiligheids- en hulpinstallaties bij kerncentrales, vallen onder de bevoegdheid van de federale overheid. Op 23 juni 2004 werd het Belgische Nationale Toewijzingsplan, dat geldt voor de periode 2005-2007, voorgelegd aan de Europese Commissie, die het integraal goedkeurde. De Vlaamse installaties stootten in 2005 samen ongeveer 55 Mton CO₂-equivalenten uit, waarmee ze ruim onder de

toegekende 60 Mton bleven (Ecotips, 2006). Voor de periode 2008-2012, wanneer de tweede handelsperiode loopt, is er een nieuw Toewijzingsplan opgesteld waarover de Europese Commissie een beslissing moet nemen voor eind 2006. In de tweede toewijzingsperiode mogen ook de andere broeikasgassen, naast CO₂, opgenomen worden in het handelssysteem. Een tweede verschil tussen beide toewijzingsplannen is dat tijdens de eerste periode bepaalde inrichtingen konden uitgesloten worden van het systeem van de verhandelbare emissierechten, terwijl dit in de tweede periode niet meer mogelijk is. Nieuwkomers zullen pas emissierechten toegewezen krijgen als de betrokken inrichting daadwerkelijk in dienst wordt genomen. Op de emissiekredieten die verkregen worden door Joint Implementation of via het Clean Development Mechanism wordt een limietpercentage gezet. (Minaraad, 2006)

Tot het einde van 2007 zal de Belgische federale overheid uitsluitend gebruik maken van Joint Implementation en van het Clean Development Mechanism. De aankoop van emissierechten afkomstig uit dergelijke projecten zal bekostigd worden uit het zogenaamde Kyoto-fonds. De federale aankopen zijn goed voor 2,46 Mton CO₂-equivalenten per jaar, wat goed is voor 17,5 % van het tekort. De aankoop van emissierechten wordt geschat op 10 MEUR op jaarbasis, ofwel 4,06 EUR per ton CO₂-equivalent. (Emis, 2006) De kosten van de emissierechten schommelden nochtans tussen 18 EUR /ton CO₂ en 24 EUR/ton CO₂ in juli 2005. Momenteel bedraagt de prijs ongeveer 1 EUR/ton CO₂ (Emissierechten.nl, 2007) De vermijdingskost voor het Kyoto-protocol wordt tussen 5 EUR/ton CO₂ en 20 EUR/ton CO₂ geschat. Bickel en Friedrich (2005) nemen 19 EUR/ton CO₂ als centrale waarde voor de vermijdingskost. Wanneer de reductietargets strenger worden, bijvoorbeeld wanneer de Europese Unie de temperatuursstijging wil beperken tot 2 K boven de pre-industriële temperaturen, stijgt de marginale reductiekost tot ongeveer 95 EUR/ton CO₂.

3.2.4 Bubble

Eyckmans (1998) en Grubb (2000) noemen het principe van de Bubble een vierde mechanisme. De Europese Unie wil via dit mechanisme als één partij beschouwd worden, met één reductiedoelstelling. Deze koepelstructuur houdt in dat de lidstaten van de Europese Unie onderling een akkoord mogen sluiten om de aan de EU opgelegde emissiebeperking van 8 % te herverdelen. Op die manier krijgt elke lidstaat een eigen quotum toegewezen. Deze quota zijn terug te vinden in tabel 7 op pagina 64. Bij het vaststellen van de verdeling is rekening gehouden met kosten- en rechtvaardigheidsargumenten. Landen waar bijkomende reducties zeer duur zijn omdat ze vooral met niet-koolstofintensieve technologieën aan elektriciteitsproductie doen, krijgen kleinere beperkingen opgelegd. Dit is een voorbeeld van het kostenaspect. Het rechtvaardigheidsaspect verminderde de inspanningen van landen als Griekenland en Portugal. Het interessante aan een Bubble is dat de uitstootverminderingen kunnen gerealiseerd worden in het land waar ze relatief minder kosten. Doordat de verdeling niet alleen gebaseerd is op de reductiekosten, maar ook

rekening houdt met de draagkracht – gemeten volgens het per capita inkomen – is de verdeling van de inspanningen niet noodzakelijk deze om tot de laagst mogelijke kost te komen. Om het broeikasbeleid aan minimale kost te realiseren gaat de EU nog andere middelen moeten inzetten zoals verhandelbare emissierechten of Joint Implementation. Naarmate er meer verschil is in de marginale bestrijdingskosten tussen de deelnemers wordt een Bubble-constructie interessanter.

Ook in België werd de Kyoto-doelstelling van 7,5 % nog verder verdeeld, namelijk tussen de verschillende gewesten. Het Vlaamse Gewest, dat instaat voor een daling van 5,2 % ten opzichte van het uitstoot niveau van 1990, moet bijgevolg de uitstoot van broeikasgassen in de periode 2008 tot 2012 beperken tot jaarlijks gemiddeld 83,436 Mton CO₂-equivalenten. (Minaraad, 2006; Exxon Mobil Reflex, 2006)

De flexibele mechanismen kunnen slechts als aanvulling op de nationale maatregelen gelden. In de akkoorden van Marrakech staat dat binnenlandse reductie-inspanningen significant moeten zijn. (Eyckmans, 1998; UNFCCC, 2006; FRDO; 2006)

3.2.5 Bijkomende aspecten van flexibiliteit in het Kyoto-protocol

Het Protocol heeft nog twee bijkomende aspecten van flexibiliteit, namelijk "banking" en vermindering van CO₂ via putten. In het Protocol wordt dit laatste "Land Use Change Land Use Forestry" (LUCLUF) genoemd. Met de term "banking" wordt bedoeld dat de partijen een deel van hun emissierechten mogen behouden om ze te verschuiven naar een latere periode. De daling van CO₂ via putten, opgenomen in artikel 3 van het Protocol, werkt als volgt: gewassen absorberen CO₂ via fotosynthese waarbij koolstofdioxide wordt omgezet in zuurstof. Een grote meerderheid van de bossen, waaronder ook de Belgische, absorbeert meer CO₂ dan ze uitstoot. Daarom vormen deze ecosystemen zogenaamde CO₂-putten. (FRDO, 2006) Bradley (2003) geeft aan dat het gebruik van putten (of sinks) door de Europese Commissie wordt uitgesloten. De Europese Commissie vindt dergelijke projecten te limiterend, zowel met het oog op de bescherming van het klimaat, als vanuit het gezichtspunt van technologie-overdracht. Bovendien, zo zeggen Jensen en Thelle (2001) is het zeer moeilijk te meten hoeveel CO₂ er in putten wordt vastgehouden. Totten, Pandya en Janson-Smith (2003) waarschuwen dat bebossing en herbebossing daarenboven kunnen leiden tot toename van de CO₂-uitstoot wanneer deze projecten worden toegepast met inadequate of slecht ontworpen regels en richtlijnen. Bovendien worden bossen een bron van CO₂ als het warmer wordt. Dit wordt verklaard door het feit dat wanneer het warmer wordt er netto minder CO₂ wordt vastgelegd doordat de activiteit van de microben die plantaardig afval afbreken en zo CO₂ losweken sneller wordt dan de activiteit van de bomen.

3.3 Moeilijkheden in toepassing

3.3.1 Moeilijkheden met internationale milieuproblemen

Internationale milieuproblemen zijn moeilijk op te lossen om een aantal redenen. Het tegengaan van het broeikaseffect is een voorbeeld van een publiek goed. Begg, Fischer en Dornbusch (2003) en Blauwens (1988) definiëren een publiek goed als volgt: een publiek goed kan geconsumeerd worden, zonder dat hierdoor de hoeveelheid die beschikbaar is voor anderen wordt vermindert. Dat wordt met de term niet-rivaliteit aangeduid. Ook kan niemand worden uitgesloten van gebruik van een publiek goed. Dit kenmerk noemt men niet-uitsluitbaarheid. Door deze twee kenmerken is een publiek goed sterk vatbaar voor het "Free Rider" probleem. In een toepassing op het probleem van de opwarming van de aarde wil dit zeggen dat landen niet geneigd zijn om de kosten van een emissiereductie opgelegd door het Kyoto-protocol op zich te nemen als ze toch niet van de voordelen van een globale uitstootvermindering kunnen worden uitgesloten. Eyckmans (1998) sluit hierbij aan door te spreken over de spontane ondervoorziening van publieke goederen. Elk land houdt enkel rekening met de individuele baten voor dat land, de vermindering van milieuschade in eigen land dus. De milieuschade aan andere landen wordt buiten beschouwing gelaten. Voor een goede werking van het Kyoto-protocol is het noodzakelijk dat elk land de kost van een extra emissiedaling afweegt tegen de milieubaat voor het eigen land én de opbrengst in andere landen. Dit is nodig om een optimale voorziening van het publiek goed te bewerkstelligen. Dit is een ethische doelstelling van de economie. Bovendien moet er aan de kostenefficiëntie voldaan zijn. Kostenefficiëntie houdt in dat de marginale bestrijdingskost, de kost voor een eenheid extra emissiereductie, in alle landen gelijk is. De flexibele mechanismen kunnen gebruikt worden om deze voorwaarde te bereiken. Wanneer de marginale bestrijdingskost niet gelijk is in alle landen betekent dit dat dezelfde reductie goedkoper geproduceerd kan worden. Het is dan namelijk mogelijk om een eenheid uitstootvermindering te herverdelen van een land met een hoge marginale bestrijdingskost naar een land met lagere marginale bestrijdingskosten. De enige mogelijkheid om ervoor te zorgen dat landen rekening houden met alle baten voor de anderen bestaat erin om goede internationale milieuoovereenkomsten op te stellen.

Een goed milieuakkoord moet volgens Eyckmans (1998) voldoen aan 3 voorwaarden.

- a) Een eerste voorwaarde is dat het voor een land interessanter moet zijn om deel te nemen dan om niet deel te nemen. Er moet voor elk land dus een netto baat zijn. In het Kyoto-protocol is deze voorwaarde niet echt vervuld, omdat de toekomstige grote vervuilers zoals China en India geen verplichtingen hebben opgelegd gekregen. Voor hen is de netto baat om hun broeikasgasemissies te beperken heel klein. Zij zouden moeten betaald worden door de andere landen om een akkoord te aanvaarden.

- b) Verder moet er wegens het "Free Rider"- of "Vrijbuiters"-probleem voor gezorgd worden dat er een systeem van sancties is. Anders gaan sommige landen hun eigen quota niet nakomen en profiteren van de inspanningen van andere ondertekenaars van het akkoord. Hiertegen bestaan wel twee oplossingen: men kan strafmaatregelen opleggen aan landen die hun verplichtingen niet nakomen, zoals handelssancties, ofwel moet er op regelmatige tijdstippen opnieuw onderhandeld worden over het hele akkoord. In dat geval zouden de landen die hun verplichtingen wel nakwamen in de volgende onderhandelingsronde een kleinere verplichting opgelegd krijgen zodat de milieubaat voor de "Free Rider" kleiner wordt. De sancties in het Kyoto-protocol worden besproken in paragraaf 3.5 Sancties.

- c) Een derde voorwaarde is dat er voldaan is aan kostenefficiëntie. Het verdelen van de inspanningen om de emissiereductiekosten te minimaliseren is niet noodzakelijk voor het functioneren van een milieuakkoord, maar het helpt wel. Voor een optimale verdeling van de inspanningen is kostenefficiëntie zoals eerder vermeld wel essentieel.

3.3.2 Moeilijkheden door het tijdsinterval en onzekerheid

Een tweede aspect dat het moeilijk maakt om een internationaal verdrag zoals het Kyoto-protocol toe te passen, bestaat uit het feit dat het tijdsinterval tussen de emissies, of de uitstootverminderingen, en hun effect op het klimaat langer is dan de tijd dat een bepaalde regering aan het bewind is of langer dan de tijdelijke horizon van reductieplannen. De klimaatveranderingen ten gevolge van de uitstoot van broeikasgassen spelen op lange termijn, de reductieprojecten daarentegen hebben betrekking op korte tot middellange termijn. (CEESE, 2004) Door deze kloof is het noodzakelijk dat er doelen op korte termijn worden opgesteld. Het is belangrijk om in het achterhoofd te houden dat de atmosferische concentraties van broeikasgassen na de stabilisatie van de emissies nog blijven toenemen gedurende enkele eeuwen. Hier speelt dus de politieke – ecologie paradox. Politieke partijen zijn niet altijd bereid geld uit te geven voor maatregelen wanneer ze niet van de baten ervan kunnen genieten. Om de CO₂-concentratie te stabiliseren is het bijgevolg essentieel om de uitstoot van broeikasgassen na stabilisatie sterk te verminderen onder het huidige niveau. Bovendien zullen de temperatuur en het zeeniveau door de sterke inertie van de oceanen nog enkele eeuwen blijven stijgen nadat de CO₂-concentratie gestabiliseerd is. Dit wordt ook in figuur 9 op pagina 60 voorgesteld. Het tijdsaspect brengt nog een ander probleem met zich mee. Voordelen in de toekomst dalen sterk in waarde wanneer ze in geldeenheden van vandaag worden uitgedrukt door het gebruik van actualisatie of verdiscontering. Volgens dit principe is elke euro nu meer waard dan een euro in de toekomst. (Laveren et al., 2004) In CESE (2004) wordt hier tegen in gebracht dat het niet ethisch verantwoord is om een discontovoet te gebruiken voor klimaatsvoordelen omdat het tijdsbestek verder gaat dan generaties. Een andere oplossing bestaat erin om de discontovoet te laten dalen naarmate men

verder in de tijd gaat. Dit hangt ook samen met de eerder genoemde transgenerationale solidariteit.

Tabel 8 kan dienen om de onzekerheid en het tijdsaspect te visualiseren. De onzekerheid, die wordt weergegeven in de eerste kolom van de tabel, heeft betrekking op het niveau waarop de CO₂-concentratie zich zal stabiliseren. Schattingen voorspellen dat wanneer er geen acties worden ondernomen om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren de atmosferische concentratie van CO₂ in 2100 een niveau tussen 540 en 970 ppm zal bereiken. Dit komt overeen met een temperatuurstijging tussen 1,4 K en 5,8 K. Door deze onzekerheid is het moeilijk om een internationaal akkoord op te stellen. In 2005 bedroeg de globale gemiddelde CO₂-concentratie 381 ppm. (MIRA, 2007) Wanneer men een stabilisatie wil tussen 750 en 1000 ppm, moet de huidige emissiehoeveelheid gehalveerd worden. Om 550 ppm te bereiken, is er een daling van 60 % tot 80 % van het huidige niveau nodig tegen 2100 en voor 450 ppm is deze verlaging al binnen 20 tot 30 jaar nodig. Het tijdsaspect komt naar voor in de laatste kolom van tabel 8. Afhankelijk van het niveau waarop de CO₂-concentratie zich zal stabiliseren wordt weergegeven wanneer het niveau van 1990 bereikt wordt.

Tabel 8: Verschillende scenario's voor CO₂ stabilisatieniveaus

WRE CO ₂ stabiliza- tion profiles	Accumulated CO ₂ emissions 2001 to 2100 (GtC)	Year in which global emissions peak	Year in which global emissions fall below 1990 level
450	365-735	2005-2015	<2000-2040
550	590-1135	2020-2030	2030-2100
650	735-1370	2030-2045	2055-2145
750	820-1500	2040-2060	2080-2180
1000	905-1620	2065-2090	2135-2270

Bron: CEESE (2004: 51)

Een tweede punt van onzekerheid naast het stabilisatie niveau van de CO₂-concentratie is het ontbreken van wetenschappelijke gegevens om heel precies de impact van uitstootreducties te kwantificeren en om te bepalen wat de precieze gevolgen zouden zijn als er niets aan de opwarming van de aarde gedaan wordt. Zowel aan de kosten om de reducties te bewerkstelligen als aan de baten voor het milieu zijn onzekerheden verbonden. Dit maakt een beleid op basis van economische overwegingen moeilijk.

Voor regeringsfunctionarissen is het niet gemakkelijk om uitstootbeperkingen te verplichten wanneer de voordelen daarvan weinig duidelijk en weinig tastbaar zijn voor de burgers. Hierdoor zijn regeringsleiders geneigd om eventuele engagementen zo lang mogelijk uit te stellen, totdat de wetenschap meer feiten en gegevens ter beschikking kan stellen. Bovendien verwacht men dat over enkele jaren de reducties eenvoudiger te verwezenlijken zullen zijn door de opmars van nieuwe technologieën. Deze afwachtende visie, dat het gemakkelijker en goedkoper is om de

verminderingen in de toekomst te realiseren dan nu, wordt door sommige auteurs tegengesproken (CEESE, 2004). Hun redenering is dat naargelang de tijd verstrijkt het moeilijker en duurder wordt om gedragingen te veranderen en om broeikasgasintensieve technologieën om te zetten. Hoe sneller er gehandeld wordt, hoe groter de waaier van mogelijke acties die kunnen gehouden worden in het geval dat de potentiële milieuschade duidelijker wordt in de toekomst.

3.4 Hoever staat België

De broeikasgasemissies namen af in de meeste sectoren in de periode 1990 tot 2003 in de Europese Unie, vooral in de industriële processen en de landbouw. In totaal stegen de emissies wel licht, ook in België. De transportsector kent echter een uitstootstijging van ongeveer 24 % en voorspeld wordt dat de verhoging tegen 2010 zelfs 31 % zal bedragen. (EEA, 2005) Volgens CEESSE (2004) zullen 10 van de vroegere 15 Europese lidstaten, waaronder België, in de problemen komen om hun quota te halen. Albrecht spreekt dit tegen. (Albrecht, geciteerd door Pompen, 2005) Hij zegt dat België de doelstelling nog kan halen, dankzij de officiële bijstelling van het cijfer van 1990 naar 142,5 Mton CO₂-equivalenten. Ook in het rapport van de European Environment Agency (EEA) (2005) staat vermeld dat België denkt de opgelegde beperking te kunnen halen door het gebruik van binnenlandse maatregelen, aangevuld met de flexibele mechanismen, hoewel ze in 2003 nog teveel uitstootten wanneer er een hypothetisch lineair pad zou gevisualiseerd worden tussen de opgelegde quota en de emissies in het basisjaar. De belangrijkste aanvullende binnenlandse maatregelen die door de lidstaten genoemd worden, zijn het promoten van elektriciteitsopwekking uit hernieuwbare energiebronnen, warmtekrachtkoppeling of cogeneratie en verhoging van de energie-efficiëntie.

Vlaanderen, zo schrijft Minaraad (2006), zal naar schatting een beleidskloof van 3,2 Mton CO₂-equivalenten hebben in 2010 op basis van de meeste actuele prognoses. Bij de berekening van deze kloof wordt er van uitgegaan dat de Vlaamse overheid de voorspelde groei bij de bedrijven naar beneden kan corrigeren met 1 Mton. Indien de correctie van 1 Mton niet gebeurt of onvolledig plaatsvindt, kan de kloof nog een derde hoger liggen.

Wanneer er toegespitst wordt op de transportsector blijkt dat de CO₂-emissies afkomstig van personenwagens in de periode van 1995 tot 2003 verlaagd werden met 12 %, maar omdat er 16 % meer auto's verkocht werden in dezelfde periode werd deze efficiëntieverbetering tegengewerkt. In 1995 stootten de voertuigen nog 186 g/km uit, terwijl dit tegen 2008 nog 140 g/km zou moeten zijn. De CO₂-uitstoot in g/km per wagen neemt dan misschien wel af, de totale emissies van het hele wagenpark stijgen wel door het toenemende aantal voertuigen. De CO₂-emissies gerelateerd aan brandstofverbruik zullen bijgevolg naar schatting blijven stijgen door de toename aan mobiliteit. De daling met 12 % is vooral te danken aan efficiëntieverbeteringen, hoofdzakelijk bij

dieselvoertuigen, en aan het relatieve minder gebruik van benzinevoertuigen ten voordele van dieselvoertuigen. Dieselvoertuigen stoten dan weliswaar minder CO₂ uit dan benzinevoertuigen, ze hebben dan weer andere schadelijke effecten die meer uitgesproken zijn dan bij benzinevoertuigen zoals de emissie van fijn stof, dat besproken werd in hoofdstuk 2 onder paragraaf 2.2 Ecologie. (Mayeres, 2006) De CO₂ die door personenwagens werd uitgestoten tussen 1995 en 2003 nam toe met 30 %. België verwacht wel dat door bijkomende maatregelen de groei in transportemissies kan gestopt worden. De Europese auto-industrie neemt het vrijwillig op zich om de CO₂-uitstoot van nieuwe auto's te verminderen door tegen 2008 een doel van 140 g/km²⁶ vast te stellen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a; EEA, 2005; ACEA, 2007) Martens (2006) van Febiac geeft aan dat de autoconstructeurs nu 155 g/km bereiken voor veel diesels. Maar de gemiddelde uitstoot van nieuwe privéwagens schommelt nog steeds rond 160 g CO₂/km. (Louyet en Convié, 2006) Het rapport van IEEP (2005) vermeldt dat de maatregel van 140 g/km kosteneffectief is en zelfs een netto-opbrengst voor de maatschappij met zich meebrengt. Volgens Minaraad (2006) wil het Europese parlement een quorum van 120 g/km CO₂ tegen 2012. Dit moet verwezenlijkt worden door een reductie van de uitstoot via kosten-effectieve technische maatregelen tot 130 g/km en een verdere daling tot 120 g/km door andere maatregelen (ACEA, 2007). Verschillende studies betwijfelen echter of deze doelstelling wel haalbaar is. De oorspronkelijk gunstige daling tot 2002 schijnt zich namelijk minder sterk door te zetten in 2005. (MIRA, 2005 geciteerd door Van Mierlo, 2006) Een belangrijke opmerking, die Van Herbruggen en Proost (2002) maken, is dat de uitstootcijfers van CO₂ gemeten worden op testbanken, de effectieve emissies van de wagens op de weg ligt echter hoger. De verklaring hiervoor is drieledig; de acceleraties in de meetprocedures zijn lager dan de acceleraties die gemeten worden op de weg, de autoconstructeurs stellen hun testvoertuigen af om de gemeten emissies zo laag mogelijk te houden en de metingen worden uitgevoerd met standaard, smalle, banden en met wagens zonder opties zoals airconditioning. Dergelijke opties kunnen echter een significante invloed hebben op de emissies. Hoewel de doelstelling van 120 g/km misschien niet gehaald zal worden tegen 2012 zullen de emissies van de wagens nog wel verder afnemen door de Europese labelling-richtlijn, die tot doel heeft informatie over brandstofverbruik en CO₂-emissies van personenwagens beschikbaar te maken voor de consument. Ook de promotie van zuinige wagens door fiscale maatregelen zal bijdragen tot een verdere daling van de emissies.

De Borger en Proost (2006) beweren dat het opleggen van normen aan het maximale verbruik niet efficiënt is omdat aan het opleggen van dergelijke normen ook kosten verbonden zijn die veel hoger liggen dan de baten die uit de normen voortvloeiën. Ter illustratie: de kost om via het opleggen van grenzen aan het maximale verbruik CO₂ te reduceren, bedraagt 452 EUR/ton CO₂, terwijl de baten van een ton minder emissies slechts op 30 EUR/ton CO₂ geraamd worden.

²⁶ Dit komt overeen met een gemiddeld dieselverbruik van 5,3 l/100 km en voor benzine een gemiddeld verbruik van 6,0 l/100 km. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)

3.5 Sancties

Maes (2006) schrijft dat er bij niet-naleving van verplichtingen uit milieuverdragen geen beroep gedaan wordt op een internationaal rechtscollege omdat een rechterlijke regeling te confronterend zou zijn. Het gaat namelijk niet om een juridische vraag, een kwestie van interpretatie, maar om een capaciteits- of een opportuiniteitskwestie. Er zijn twee benaderingen voor de nalevingsmechanismen in milieuverdragen: de "management school" en de "enforcement school". Terwijl bij de eerste er enkel ondersteunende maatregelen worden gebruikt bij niet-naleving, pleit de tweede benadering voor zowel ondersteunende als afdwingbare maatregelen afhankelijk van de ernst van de niet-naleving. Het Kyoto-protocol behoort tot de tweede benadering.

De rechtsbasis van het nalevingmechanisme wordt gevormd door artikel 18 van het Kyoto-protocol. Tijdens de akkoorden van Marrakech in 2001 werd de inhoud van dit mechanisme verder ingevuld. Deze akkoorden leidden tot de oprichting van een "Nalevingscomité" bestaande uit twee kamers: een ondersteunende kamer of "Facilitative Branch" en een handhavende kamer of "Enforcement Branch". Maes (2006) vermeldt dat elke kamer uit 10 leden bestaat die worden verkozen door een COP/MOP (Conference of Parties / Meeting of Parties) op basis van hun individuele expertise en onafhankelijk van de COP/MOP beslissingen nemen. De twee kamers hebben verschillende bevoegdheden.

De ondersteunende kamer heeft een hulpverlenende en adviserende taak en is in principe bevoegd voor alles wat niet onder de bevoegdheid van de handhavende kamer behoort. De ondersteunende kamer dient de partijen te waarschuwen voor potentiële niet-naleving van het Protocol. Ze kan aanbevelingen doen om het risico tot het niet bereiken van de gekwantificeerde emissiequota te reduceren. Deze kamer heeft eveneens de bevoegdheid om na te gaan of de flexibele mechanismen inderdaad slechts aanvullend gebruikt worden naast de binnenlandse maatregelen. Ook gaat deze kamer na of de reductiemaatregelen zo genomen worden dat ze minimale nadelige gevolgen hebben op sociaal, economisch en milieuvlak voor de ontwikkelingslanden. De volgende maatregelen kunnen door de ondersteunende kamer getroffen worden in geval van niet-naleving:

- het verstrekken van advies aan de individuele partijen,
- het vergemakkelijken van steun bij de uitvoering van het Protocol,
- het vergemakkelijken van financiële en technische hulp, inclusief technologietransfer en capaciteitsopbouw,
- het formuleren van aanbevelingen aan de betrokken partij. (Maes, 2006)

De handhavende kamer is volgens Maes (2006) een quasi-judicieel orgaan dat strafmaatregelen kan verbinden aan de niet-naleving van het Protocol. Er kan wel beroep worden aangetekend tegen deze beslissingen bij de COP/MOP, waarna de handhavende kamer de zaak opnieuw beoordeelt. De

bevoegdheid van de handhavende kamer strekt zich enkel uit tot de naleving van de verplichtingen door Annex I-landen. Deze verplichtingen zijn:

- emissiereductieverplichtingen,
- verplichtingen tot rapportage en de criteria waaraan voldaan moet worden om de flexibele mechanismen te mogen gebruiken.

Deze criteria zijn terug te vinden in voetnoot 25 op pagina 65. De vaststelling van eventuele overtredingen en het opschorten van het recht op deelname aan deze mechanismen gebeurt op basis van jaarlijkse reviews van de emissie-inventarissen. Ook andere partijen kunnen opschorting van het deelnamerecht vragen door het gebruik van een implementatievraag die voorgelegd wordt aan de handhavende kamer. De opschorting van het deelnamerecht blijft van kracht, tenzij de partij kan bewijzen dat ze haar doelstelling zal halen. Ook het niet behalen van het reductiequotum door een land geeft aanleiding tot het opschorten van de deelname aan de flexibiliteitsmechanismen. Wanneer de plichten inzake rapportering van de uitstootgegevens niet worden nageleefd, zal de handhavende kamer dit bekend maken. Deze maatregel staat bekend als "naming and shaming". De handhavende kamer tracht ook te voorkomen dat de werkelijke netto-emissies van een partij worden onderschat. Op deze manier wordt vermeden dat landen meer uitstoten dan ze rapporteren en de milieu-integriteit van het Protocol op die manier in het gedrang gebracht wordt.

De bestraffende component bestaat eruit dat de emissies bij onderschatting door de handhavende kamer worden bijgesteld op een hogere waarde dan door de partij gerapporteerd werd. Deze verhoging betekent een relatieve verstrenging van de doelstelling en dus een straf omdat er meer moet gereduceerd worden. Indien een land moedwillig of door te weinig inzicht in de emissiesituatie teveel van de aan hem toegewezen emissie-eenheden zou verkopen, dan loopt die natie het risico om op het einde van de verbintenisperiode over onvoldoende emissierechten te beschikken om aan zijn quota te komen. Hiervoor werd er een "Commitment Period Reserve" (CPR) ingesteld. Dit houdt in dat de partijen steeds een bepaalde reserve aan emissierechten moeten overhouden. Wanneer ze hun reserve door een bepaalde transactie overschrijden, dan wordt deze transactie afgebroken en ongeldig gemaakt. Er worden dan een aantal emissierechten afgetrokken van het totaal aantal emissierechten van een land, wat een straf is omdat hierdoor de reductiedoelstelling relatief strenger wordt. Wanneer de quota uit het Protocol worden overschreden, wordt het recht om emissierechten te verkopen opgeschort, om te voorkomen dat het land in kwestie nog zoveel mogelijk rechten gaat trachten te verzilveren alvorens uit het Protocol te stappen om zo de "restoration rate" te ontlopen. Deze straf houdt in dat bij de toegewezen hoeveelheid emissierechten van de tweede verbintenisperiode een hoeveelheid emissierechten wordt afgetrokken die gelijk is aan 1,3 maal het tekort aan emissierechten aan het einde van de eerste verbintenisperiode, zijnde de periode van 2008 tot 2012. De partij in kwestie

moet dus niet alleen het tekort zuiveren, maar op dat tekort ook nog eens een rente van 30 % betalen. Het land moet eveneens een "compliance action plan" opstellen waarin het analyseert waarom het de reductiedoelstelling niet is nagekomen en de acties die de partij wil ondernemen in de volgende verbintenisperiode om dan de uitstootverminderingen wel na te leven.

Wanneer de Europese Unie in het geheel haar quotum haalt, maar een afzonderlijke lidstaat niet, dan heeft deze lidstaat geen nalevingovertreding begaan. Deze lidstaat is echter wel in overtreding met het Europese Gemeenschapsrecht. De Europese Commissie kan dan een procedure opstarten voor de veroordeling van de lidstaat door het Hof van Justitie voor de niet-naleving van het Europese Gemeenschapsrecht. Wanneer deze lidstaat na een tweede veroordeling van het Hof van Justitie de veroordeling niet navolgt, kan de Europese Commissie een procedure opstarten tot het opleggen van een dwangsom aan de betrokken staat. Wanneer de Europese Unie in het geheel haar doelstelling niet haalt, wordt elke lidstaat verantwoordelijk gesteld voor het halen van haar individuele doelstelling. Faalt een bepaalde lidstaat, dan is het nalevingsregime onder artikel 18 van het Kyoto-protocol voor die lidstaat van kracht. (Vlaams parlement, 2007)

4 ALTERNATIEVE AANDRIJFVORMEN

“We believe hydrogen may become a viable motor fuel in the long-term” (Schmidt G., vice-president, Research & Advanced Engineering, Ford Motor Company) [“Wij geloven dat waterstof een haalbare motorbrandstof op lange termijn kan worden.”]

Voertuigen die aangedreven worden door een motor hebben energie nodig om te accelereren – met andere woorden om inertie te overwinnen – en de aerodynamische last van de lucht op de weg en de wrijving van banden en wielen te overwinnen. Brandstof biedt deze energie aan in de vorm van chemicaliën die worden verbrand om warmte te leveren. Motoren zetten die geleverde warmte om in arbeid die uiteindelijk de wielen van de wagen doet draaien, waardoor het voertuig kan voortbewegen over de weg. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)

4.1 Diesel en benzine

Diesel en benzine worden beide geproduceerd uit aardolie en bestaan uit een mengsel van koolwaterstoffen en enkele additieven om de eigenschappen van de brandstof te verbeteren. Diesel bestaat uit een zwaardere fractie koolwaterstoffen dan benzine en is daardoor minder vluchtig en heeft een hogere energiedichtheid dan benzine. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a; Emis, 2007) Hoewel benzinevoertuigen een hoger verbruik hebben – respectievelijk voor kleine voertuigen 7 l/100km versus 5 l/100km en voor grotere gezinswagens 9 l/100km tegenover 7 l/100 km – en doorgaans meer CO₂, KWS en CO uitstoten dan hun dieselvearianten hebben dieselvevoertuigen toch een grotere negatieve milieu-impact dan de benzinevoertuigen. De dieselvevoertuigen zijn namelijk relatief grotere vervuilers van fijn stof of roetdeeltjes en stikstofoxiden. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a; Int Panis et al., 2004; VRIND, 2004) Deze roetdeeltjes hebben een belangrijke impact op de menselijke gezondheid. Hierdoor krijgen de dieselvevoertuigen, die 30 tot 100 keer meer roet uitstoten dan benzinevoertuigen en verantwoordelijk zijn voor 90 % van de totale roetuitstoot door voertuigen volgens Louyet en Convié (2006), een lagere Ecoscore toegewezen dan auto's aangedreven door benzine. (Van Mierlo et al., 2006; De Nocker, Int Panis en Mayeres, 2006) Benzinewagens stoten veel meer methaan uit dan dieselvevoertuigen, waar de methaanuitstoot bijna verwaarloosbaar is. (Ministerie Vlaamse Gemeenschap, 2003) De lagere uitstoot van broeikasgassen weegt dus niet op tegen een grotere uitstoot van het geheel van pollutanten die bijdragen aan een verslechtering van de luchtkwaliteit. Toch wordt het dieselgebruik door belastingsbeleid aangemoedigd. Nu zijn er lagere accijnzen op het gebruik van diesel dan voor benzine. (De Borger en Proost, 2006) Bovendien liggen volgens Louyet en Convié (2006) de levensduur van de motor en de wederverkoop prijs hoger bij dieselwagens. Hierdoor is diesel het meest gebruikte type van brandstof. Het efficiëntieverschil tussen diesel en benzine neemt wel af.

(CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) Dieselgebruik kan bijvoorbeeld door belasting op de aankoop of door een hogere gebruiksbelasting ontmoedigd worden ten voordele van benzine. Het rapport van IEEP (2005) vermeldt dat benzinevoertuigen een groter reductiepotentieel voor broeikasgassen hebben dan dieselwagens voor een zelfde kost en grote wagens hebben meer mogelijkheden tot uitstootdalingen dan kleine wagens. De maatregelen om CO₂ te verminderen die toepasbaar zijn op dieselvoertuigen zijn minder kosten-effectief dan degenen die op benzinewagens kunnen toegepast worden.

De uitstoot van roetdeeltjes kan wel verminderd worden door het gebruik van roetfilters²⁷ en katalysatoren²⁸. Het gebruik van een katalysator brengt echter, naast een meer effectieve verbranding, een stijging van de emissies van NO_x en van NH₃ teweeg. (VRIND, 2004) Deze beide stoffen zorgen voor verzuring. Bovendien zal de uitstoot van fijn stof of PM in ieder geval afnemen door de opeenvolgende strengere voertuignormen van Euro 0 tot Euro 4, waardoor de autoconstructeurs worden gedwongen om steeds meer en nieuwe inspanningen te doen om hun voertuigen meer milieuvriendelijk te maken, volgens Schrooten et al. (2005). Dit brengt met zich mee dat volgens de auteurs geen extra maatregelen voor de vermindering van PM moeten genomen worden. Deze extra maatregelen zouden ook niet kosteneffectief zijn. Een overzicht van de verschillende Euronormen werd reeds in het hoofdstuk 2 gegeven.

Benzine brengt een gevaar op brand met zich mee. Bovendien kan het inademen van benzinedampen aanleiding geven tot hoofdpijn, draaierigheid, braakneigingen en bewusteloosheid. Dieseldampen zijn toxisch en kankerverwekkend. Ook is diesel sterk ontvlambaar. (VUB, VITO en CEESE, 2005)

Keuze voor de aanschaf van een proper voertuig hangt volgens Van Mierlo et al. (2006) af van de technologie zelf, maar ook van de beschikbaarheid van de brandstoffen, het gebruikersprofiel, de vereiste extra investeringen, de risico's van de nieuwe technologie en het onderhoudsnetwerk. JRC, IPTS en ESTO (2003a) en Van Mierlo (2006) halen aan dat milieuvriendelijke voertuigen nog te kampen hebben met een service-, onderhouds-, dienst na verkoop- en marketingprobleem. De geleverde dienst na verkoop en service beïnvloeden nochtans de aankoopbeslissing. Ook de verwachte betrouwbaarheid en het merkimage spelen een rol. Tegenwoordig wordt milieuvriendelijkheid door de autoconstructeurs als een belangrijke troef uitgespeeld. (IEEP, 2005)

²⁷ Een roetfilter is niet verplicht en evenmin noodzakelijk om de Euro 4-norm te halen, maar zorgt wel voor een aanzienlijke daling van de uitstoot van PM_{2,5}. De externe kosten van Euro 4-dieselwagens met roetfilter liggen wel ongeveer drie keer lager dan die van dieselwagens zonder roetfilter, maar hebben nog steeds een hogere externe kost dan Euro 4-benzinewagens. (De Nocker, Int Panis en Mayeres, 2006) Een roetfilter kan de uitstoot van roet met zelfs 98 % verminderen. (Louyet en Convié, 2006) Volgens Van Mierlo et al. (2006) zullen roetfilters vanaf Euro 5 waarschijnlijk wel verplicht worden. De Europese Commissie wil dat Euro 5 ingaat vanaf september 2009. Momenteel in Euro 5 nog in onderhandeling. (VOKA, 2007)

²⁸ Een katalysator is volgens Van Mierlo et al. (2006) een vorm van nabehandeling waarbij stoffen als NO_x en CO worden opgevangen. Koolwaterstoffen worden omgezet in water en CO₂ en stikstofoxiden in stikstof en zuurstof. Het systeem werkt wel pas bij 300°C, dus werkt niet voor korte afstanden. (Louyet en Convié, 2006)

Om een benadering te maken van de volledige milieu-impact van een voertuig, is de Ecoscore ontwikkeld, die al beschreven is in hoofdstuk 2. De Ecoscore werd ontwikkeld door VITO, CEESE en VUB en brengt zowel het broeikas-effect, gezondheidseffecten, effecten op ecosystemen en geluidshinder in rekening. De methode is gebaseerd op een Well-to-Wheels-analyse en houdt dus naast de directe emissies die vrijkomen tijdens het rijden ook rekening met de indirecte uitstoot die ontstaat bij productie en distributie van de brandstof. (Van Mierlo et al., 2006)

Bij de conventionele voertuigen wordt er ongeveer 15 % van de energie uit de brandstof gebruikt om het voertuig te bewegen en nuttige accessoires zoals de airconditioning aan te drijven. De rest van de energie gaat verloren. Hierdoor is het potentieel om de brandstofefficiëntie te verbeteren enorm. Substitutie van auto-onderdelen door lichtere materialen met grote sterkte kunnen de massa van het voertuig verminderen en hierdoor de energie die nodig is om te accelereren. Meer aerodynamische voertuigvormen kunnen het energieverlies aan luchtweerstand verminderen en gevorderde ontwerpen voor autobanden kunnen zorgen voor een daling van de weerstand. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)

4.2 LPG

Liquefied Petrol(eum) Gas bestaat vooral uit propaan en butaan en is een bijproduct van olieraffinage, waardoor het aan lage kost kan geproduceerd worden. Het komt ook vrij bij de winning van aardolie en aardgas. Vanaf een druk van 4 bar is LPG vloeibaar. Het merendeel van de LPG-voertuigen zijn momenteel aangepaste benzinevoertuigen. Het aandeel van de auto's die speciaal voor LPG werden ontwikkeld is klein. De verhouding van de componenten in LPG verschilt van land tot land. In België is er tevens een verschil tussen de samenstelling in de zomer en in de winter. Om te zorgen dat LPG bij lage temperaturen voldoende druk heeft, is het bestanddeel butaan in de winter lager dan in de zomer. In de winter bevat LPG 70 % propaan en 30 % butaan, terwijl LPG in de zomer uit 60 % propaan en 40 % butaan bestaat. (Emis, 2007) De motoren kunnen deze variabiliteit zonder veel problemen aan. De LPG tank moet ongeveer 1,4 maal groter zijn dan een benzinetank om dezelfde afstand te kunnen rijden. Dit valt te verklaren door de lagere energie-inhoud van LPG enerzijds en anderzijds door het feit dat om veiligheidsredenen de tank slechts voor 80 % gevuld is. (Van Mierlo et al., 2006) Dat de tank slechts voor 80 % gevuld mag zijn, valt te verklaren door het feit dat LPG zwaarder is dan lucht. In geval van een lek zal de damp dus laag boven de grond blijven hangen, waar hij in aanraking kan komen met ontstekingsbronnen. In moderne systemen is het lekken niet meer mogelijk doordat er een vulbegrenzer is aangebracht. (Emis, 2007) Bovendien wordt LPG meestal vermengd met een geurstof. (VUB, VITO en CEESE, 2005) Voertuigen die oorspronkelijk zijn uitgerust met een LPG-tank, zijn wat veiligheid betreft vergelijkbaar met een benzine- of dieselwagen. Omgebouwde voertuigen blijken volgens de VUB, VITO en CEESE (2005) niet altijd even veilig te zijn. Omdat LPG

verdampt, levert het geen gevaar op voor het grondwater. Ook is LPG niet toxisch. Benzine en diesel zijn niet oplosbaar in water, maar kunnen toch het grondwater vervuilen.

LPG voertuigen verbruiken volgens Van Mierlo et al. (2006) wel meer dan benzine- of dieselveertuigen, namelijk 9 tot 10 l/100 km voor kleine auto's en 11 tot 12 l/100 km voor grotere gezinswagens. Het hoger verbruik wordt voor een stuk veroorzaakt door de lagere volumetrische²⁹ energie-inhoud van LPG³⁰. Maar de totale kost per kilometer wordt vanaf 10 000 km/jaar kleiner voor LPG-voertuigen dan voor benzine-wagens. (VUB, VITO en CEESE, 2005)

De CO₂- en CO-uitstoot van LPG-voertuigen zijn iets hoger dan die van dieselveertuigen, maar lager dan die van benzinevoertuigen. LPG-voertuigen hebben lagere waarden voor de andere schadelijke emissies: NO_x, SO₂ en KWS. Ook de uitstoot van PM ligt lager. (Emis, 2007) Hiervoor is een goed onderhoud onontbeerlijk. Anders kunnen NO_x en KWS emissies hoog oplopen. Enkel een hoogtechnologische LPG-installatie kan een vermindering van de emissies bewerkstelligen bij het ombouwen van een bestaand benzinevoertuig. Bij een oorspronkelijk geïnstalleerde LPG-tank kan de NO_x-uitstoot tot 30 % lager liggen dan bij benzine-wagens en tussen 20 en 50 % lager dan bij dieselwagens.

Het rendement van een conventioneel voertuig is lager dan 15 % in een stad. Dieselmotoren hebben de hoogste efficiëntie, gevolgd door benzinemotoren. Daarna komen de motoren aangedreven door gasvormige brandstoffen, namelijk aardgas en LPG. (Van Mierlo et al., 2006)

Recentere voertuigen hebben voor alle aandrijfvormen een hogere Ecoscore dan oudere voertuigen, maar de emissie van CO₂ vermindert niet steeds. Van Mierlo et al. (2006) schrijven dat dit te wijten is aan het feit dat het positieve effect van een verbeterde motortechnologie vaak wordt tenietgedaan door een toename van het voertuiggewicht of een hoger energieverbruik door bepaalde opties zoals een airconditioning. Ook Int Panis et al. (2004) vermelden dat de invloed van extra opties op de emissies aanzienlijk is. Voor conventionele voertuigen geldt dat het gewicht van het voertuig en het vermogen van de motor het verbruik bepalen. Een toename van de massa met 200 kg doet het verbruik stijgen met 8 tot 13 % bij lichtere voertuigen en 3 tot 5 % bij zwaardere voertuigen, dit zijn voertuigen met een gewicht boven 1,7 ton. Hoe kleiner het motorvermogen, hoe zuiniger de wagen voor een zelfde bouwjaar en brandstoftype. Volgens het rapport van IEEP (2005) zullen de massa, het motorvermogen en de grootte van de voertuigen in de toekomst nog toenemen.

²⁹ Gasvormige brandstoffen nemen voor dezelfde energie-inhoud meer volume in dan benzine. De volumetrische energie-inhoud van een gas-luchtmengsel is dus kleiner dan die van een benzine-luchtmengsel. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)

³⁰ Het gewicht van LPG bedraagt 0,54 kg/l. Voor benzine is dit 0,78 kg/l. Het gewicht van diesel is 0,86 kg/l. (Van Mierlo et al., 2006)

De nieuwste generatie dieselwagens is haar achterstand op de benzinevoertuigen aan het inhalen wat impact op het milieu betreft. Ook de slechtere prestaties ten opzichte van LPG-wagens verdwijnen. (Van Mierlo et al., 2006)

De uitlaatgassen van conventionele wagens worden gecontroleerd op twee manieren. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a) Er wordt getracht een meer volledige verbranding te bewerkstelligen zodanig dat er minder nevenproducten vrijkomen. Daarenboven leidt men overtollige koolwaterstofverbindingen terug naar de motor voor verdere verbranding. Op die manier bevatten de uitlaatgassen minder KWS.

4.3 Aardgas

Aardgas is een fossiele brandstof die in meerdere kleine bronnen verspreid over de hele wereld terug te vinden is. Aardgas bestaat voornamelijk uit methaan en kleine hoeveelheden koolwaterstoffen, stikstof en water. De samenstelling is echter afhankelijk van de vindplaats of van het eventueel toevoegen van andere gassen. Het is een zeer geschikte brandstof voor een verbrandingsmotor. Bij lage druk is het niet geschikt voor gebruik in voertuigen door de beperkte energie-inhoud per volume-eenheid. De energiedichtheid kan verhoogd worden door samendrukking, vloeibaar³¹ maken bij lage temperaturen, of door menging met koolstof. (Emis, 2007) De variatie in samenstelling kan problemen geven aangezien de motor volgens Van Mierlo et al. (2006) niet werd ontworpen om te functioneren met grote verschillen in de gassamenstelling.

Een aardgasvoertuig maakt gebruik van een vonkontstekingsmotor, net zoals benzinewagens en LPG-auto's. (Van Mierlo et al., 2006) Ten opzichte van conventionele voertuigen en bi-fuel versies met aardgas, scoort een voertuig op puur aardgas beter wat betreft de schadelijke emissies en brandstofverbruik. De uitlaatgassen van aardgasmotoren bestaan uit relatief veel onverbrand methaan. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) Dit is een belangrijk broeikasgas. Ook de uitstoot van koolwaterstoffen ligt hoger dan bij een benzine- of een dieselwagen. (VUB, VITO en CEESE, 2005) Maar door de lagere koolstof-waterstofverhouding, komt er minder CO₂ vrij. De lagere energie-efficiëntie compenseert dit voordeel echter. De PM-uitstoot en NO_x-emissies zijn zeer laag in vergelijking met diesel. De broeikasgasemissies en het algemene Well-to-Wheels-energieverbruik zijn echter sterk afhankelijk van zowel de vindplaats van het aardgas als de manier waarop het aangeleverd wordt. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) Een nadeel van het gebruik van aardgas is dat er een volledige afhankelijkheid van aardgastankstations en een speciaal distributienetwerk nodig is. Hierdoor wordt de kost van een vermeden ton CO₂ groter. (Emis, 2007) Dit infrastructuurprobleem vormt de grootste barrière voor de ontwikkeling van aardgas. Daarom

³¹ Het nadeel is dat vloeibaar aardgas bij zeer lage temperaturen – ongeveer -160 °C – moet worden opgeslagen in vacuümtanks. (VUB, VITO en CEESE, 2005; Van Mierlo et al., 2006)

wordt het tot nu toe nog alleen maar toegepast in niche-toepassingen en bussen. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Nochtans is er wel al een distributienetwerk voor de huishoudelijke verwarming dat misschien deels kan gebruikt worden. Een ander nadeel van het gebruik van aardgas is dat aardgasvoertuigen een vrij kleine koffer hebben omdat de tank veel ruimte in beslag neemt. Uit veiligheidsoverwegingen mag de tank maar 80 % gevuld worden, net zoals bij LPG. Daarenboven weegt de tank zwaar. Wanneer ze gevuld is, weegt ze 4 maal zwaarder dan een benzine- of dieseltank. (VUB, VITO en CESE, 2005) De autonomie van een wagen op gasvormig aardgas is ongeveer 200 tot 250 km (Van Mierlo et al., 2006). Volgens dezelfde auteurs zou de aardgastank ongeveer 5 keer groter moeten zijn dan die van een conventioneel voertuig om dezelfde autonomie te bereiken. Een voordeel van aardgasvoertuigen is dat ze significant stiller zijn dan conventionele voertuigen. (VUB, VITO en CESE, 2005)

Het grootste verschil tussen een LPG-systeem en een aardgassysteem is de opslagdruk die tot 200 bar bedraagt voor aardgas. Bovendien zijn er controle-elementen nodig om de druk te verlagen tot 5 bar vooraleer de brandstof in de motor wordt geïnjecteerd. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)

Om een lager energieverbruik te hebben dan benzinevoertuigen, moet de motor geoptimaliseerd worden voor het gebruik van aardgas.³² Ten opzichte van een dieselveertuig is het energieverbruik van een personenwagen op aardgas altijd hoger. CONCAWE, EUCAR en JRC (2006) voorspellen dat in 2010 de broeikasgasemissies beter worden dan die van diesel, zeker wanneer aardgas gebruikt wordt in combinatie met hybridisatie. Het energieverbruik zou in dat geval zelfs lager kunnen worden dan bij dieselvoertuigen. Het grootste nadeel van voertuigen op enkel aardgas blijft de beperkte afstand die ze zelfstandig kunnen afleggen, namelijk 200 tot maximaal 300 km. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a; VUB, VITO en CESE, 2005) Aardgas is lichter dan lucht en verspreidt zich dus onmiddellijk in de atmosfeer bij lekken. Wanneer het in een afgesloten ruimte vrijkomt, bestaat er wel ontploffingsgevaar. (VUB, VITO en CESE, 2005)

Er zijn twee manieren om een aardgasvoertuig van brandstof te voorzien. De eerste manier is de "quick fill" en maakt gebruik van een bufferopslag onder een druk van ongeveer 250 bar. Het voltanken duurt dan ongeveer 5 min. Bij de tweede methode, de "slow fill", wordt de tank direct door een compressor gevoed. Dit duurt ongeveer 5 uren. (VUB, VITO en CESE, 2005)

4.4 Waterstof

Waterstof is geen energiebron, maar een energiedrager. Vrije waterstof komt niet voor in de natuur. Het moet dus geëxtraheerd worden met behulp van energie. Het moet geproduceerd

³² Bij omgebouwde benzinevoertuigen ligt het energieverbruik ongeveer 10 % hoger dan bij een benzinevoertuig. Bij wagens met een motor speciaal ontworpen voor het gebruik van aardgas kan het energieverbruik dalen tot 80 % van dat van een benzinevoertuig. (Van Mierlo et al., 2006)

worden, net zoals elektriciteit. Hierdoor kunnen broeikasgassen ontstaan. De hoeveelheid uitstoot is afhankelijk van de gekozen bron en productiemethode van waterstof. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) Een voordeel van waterstof is dat het uit zowat elke primaire energiebron kan geproduceerd worden. Zo wordt de afhankelijkheid van één bron gereduceerd. Waterstof kan zowel uit steenkool, aardolieproducten, aardgas, LPG, biomassa, zon, wind als uit nucleaire energie geproduceerd worden. (de Bruijn, 2006)

4.4.1 Productie

Er zijn verschillende manieren beschikbaar om waterstof te produceren. Ze worden hieronder besproken. De veelzijdigheid van bronnen die kunnen gebruikt worden om waterstof te produceren wordt verder getoond in figuur 11 op pagina 91. Alle productiemethodes berusten op scheiding van waterstof uit een waterstofhoudende bron. De bron bepaalt de manier waarop de scheiding best dient te gebeuren. (Hydrogen Association, 2007)

Jaarlijks wordt er ongeveer 50 Mton waterstof geproduceerd over de hele wereld. Hiermee zouden 250 M brandstofcelvoertuigen kunnen aangedreven worden. (Air Products, 2007) Volgens Rifkin (2002) zal het bij de productie van waterstof steeds goedkoper worden om grotere hoeveelheden te produceren.

De productie kan centraal gebeuren, waardoor er meer pijpleidingen en andere transportmiddelen nodig zijn tot de plaats van gebruik. In een grote centrale productieplant kan men wel de economische voordelen van productie op grote schaal benutten. Een dergelijke centrale zou ongeveer 50 000 brandstofcelvoertuigen per dag kunnen bedienen. De productie van waterstof kan ook dichtbij het gebruik gebeuren. Deze productie is dan schaalbaar naargelang hoeveel wagens er van brandstof moeten worden voorzien. Het aantal voertuigen dat bediend kan worden, schommelt dan tussen 50 en 300 voertuigen per dag. Bij deze methode zijn er kleinere investeringen nodig en moet er geen uitgebreide transportinfrastructuur voor het vervoer van waterstof voorzien worden. (Hydrogen Association, 2007)

Oxidatie of reformatie

Waterstofproductie kan gebeuren via oxidatie uit gas dat afkomstig is van organische, plantaardige of fossiele stoffen. De oxidatie van fossiele brandstoffen wordt ook reformatie genoemd, waarbij fossiele brandstoffen omgezet worden in een waterstofrijk mengsel. De belangrijkste en meest gebruikte methode is stoomreformatie. Hierbij worden brandstof en stoom gemengd in de aanwezigheid van een katalysator. De brandstof wordt daarbij in een endotherme³³ reactie

³³ Bij een endotherme reactie moet er warmte toegevoegd worden. Het tegenovergestelde is een exotherme reactie waarbij warmte vrijkomt. (Put, 2006)

omgezet in H (waterstof), CO (koolstofmonoxide) en CO₂. De CO reageert met stoom verder tot CO₂. Er worden ook enkele andere onzuiverheden gevormd zodat de waterstof 97 tot 99,9 % zuiver is. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) De efficiëntie van dit proces is 70 tot 80 %. Meestal gebruikt men aardgas als bron, maar ook zwaardere gassen kunnen gebruikt worden. Deze worden echter weinig gebruikt omdat de procesuitrusting veel ingewikkelder wordt en omdat de meesten beter rechtstreeks gebruikt worden. Op korte termijn is volgens CONCAWE, EUCAR en JRC (2004) enkel aardgas, dat vrij goedkoop is en een grote beschikbaarheid heeft, een haalbare bron om op grote schaal waterstof te produceren. Maar aardgas wordt volgens dit rapport beter gebruikt in een brandstofcelvoertuig, dan rechtstreeks verbrand te worden in een vonkonthekingsmotor. Dit komt verder aan bod in de paragraaf 4.8.2 Brandstofcellen. Men moet echter op lange termijn naar andere bronnen als aardgas kijken, want anders wordt de olieafhankelijkheid gewoon vervangen door een aardgasafhankelijkheid. (USDOE, 2007) Wanneer waterstof via deze methode wordt geproduceerd, wordt de kostprijs ervan geschat op ongeveer 0,041 EUR/m³. (VUB, VITO en CEESE, 2005)

De reacties die bij stoomreformatie optreden zijn de volgende: (USDOE, 2007)

Voor methaan: $CH_4 + H_2O (+ \text{warmte}) \rightarrow CO + 3 H_2$

Voor propaan: $C_3H_8 + 3 H_2O (+ \text{warmte}) \rightarrow 3 CO + 7 H_2$

De gevormde CO reageert verder volgens de volgende reactie: (USDOE, 2007)

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 (+ \text{een beetje warmte})$

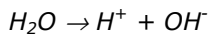
Elektrolyse

Ook elektrolyse van water kan waterstof opleveren. Dit is de eenvoudigste methode, maar dit proces is zeer energie-intensief. Hierbij wordt elektriciteit gebruikt om water, waaraan een elektrolyt is toegevoegd om het beter geleidend te maken, te splitsen in waterstof en zuurstof. Deze elektriciteit kan afkomstig zijn uit fossiele brandstoffen, maar ook uit nucleaire, wind- of zonne-energie. CONCAWE, EUCAR en JRC (2006) verwachten niet dat elektriciteit uit zonne-energie een efficiënte energiebron zal worden voor de productie van waterstof. Het thermisch splitsen van water via zonne-energie staat nog in zijn kinderschoenen. De elektriciteit uit windenergie kan beter rechtstreeks gebruikt worden. Enkel nucleaire energie biedt dus mogelijkheden om bij te dragen tot de productie van waterstof en dit met lage uitstoot van broeikasgassen. De efficiëntie schommelt tussen 50 en 85 %. (VSB, 2007) De meeste commerciële elektrolyse-installaties halen een rendement van 75 %. (Rifkin, 2002) Een voordeel van elektrolyse is dat de geproduceerde waterstof en zuurstof een zeer grote zuiverheid hebben (VSB, 2007). Vooral voor toepassingen waar de zuiverheid van de gebruikte waterstof van groot belang is, biedt elektrolyse bijgevolg goede mogelijkheden. Momenteel zorgt elektrolyse met het gebruik van elektriciteit die gemaakt wordt met de huidige mix van productiemethodes in Europa voor een hogere uitstoot van broeikasgassen dan reformatie van aardgas. Hernieuwbare bronnen hebben momenteel nog een beperkt potentieel en zijn bovendien erg duur. Daarenboven is het

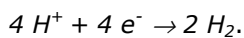
rechtstreekse gebruik van deze hernieuwbare bronnen veel efficiënter dan het aanwenden ervan voor transporttoepassingen. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Het elektrolyseproces zorgt dat de kost van de geproduceerde waterstof op ongeveer 0,10 tot 0,12 EUR/kWh terechtkomt. (VUB, VITO en CEESE, 2005) Volgens Rifkin (2002) is het niet de elektrolyse wat veel kost, maar de gebruikte elektriciteit. Het gebruik van windenergie en fotovoltaïsche energie is nu nog heel duur volgens dezelfde auteur, maar de kost zou halveren binnen de 10 jaar.

De reacties die bij elektrolyse plaatsvinden zijn de volgende: (Pergoot, Thys en Van Derstappen, 1983)

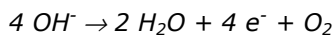
Een zeer kleine hoeveelheid waterstofmoleculen dissocieert volgens de reactie:



De H^+ -ionen zullen dan aan de kathode waterstofgas vormen volgens:



Aan de zijde van de anode worden de OH^- -ionen ontladen en vormen water en zuurstofgas:



Productie uit biomassa

De derde methode behelst het gebruik van bacteriën om waterstof direct uit biomassa te produceren. Bepaalde bacteriën consumeren water wanneer ze aan zonlicht worden blootgesteld. Als bijproduct van hun metabolische processen wordt waterstof gevormd. Dit proces staat nog maar in zijn kinderschoenen en verloopt voorlopig veel te traag om commercieel aantrekkelijk te zijn. Volgens het Amerikaanse Departement van Energie biedt het wel mogelijkheden op lange termijn. (USDOE, 2007) Biomassa is echter beperkt volgens Van Mierlo et al. (2006) en kan beter alternatief gebruikt worden. Dit productieproces heeft wel een hogere efficiëntie dan elektrolyse, waardoor het mogelijkheden biedt voor CO_2 -vermindering.

Biomassa kan ook vergast worden, net zoals kolen. Bij dit proces wordt er hitte toegevoegd onder druk en in de aanwezigheid van stoom. Door verschillende chemische reacties wordt er een synthesegas gevormd. Dit reageert verder met stoom waardoor er waterstof vrijkomt, die vervolgens kan gezuiverd worden. Waterstof rechtstreeks uit kolen produceren is veel efficiënter dan elektriciteit maken uit de verbranding van kolen en die elektriciteit vervolgens gebruiken om waterstof voort te brengen. Onderzoekers zijn bezig om methodes te ontwikkelen om de CO_2 die bij dit proces vrijkomt, af te scheiden en op te slaan³⁴. Als dit lukt, kan waterstof uit kolen worden geproduceerd met bijna geen uitstoot van broeikasgassen. Omdat biomassa CO_2 opslaat tijdens het groeiproces, resulteert de vergassing van biomassa sowieso in bijna geen broeikasgasemissies. (USDOE, 2007) Via toepassing van waterstofproductie op basis van biomassa op grote schaal, kan de kostprijs voor de productie dalen tot 0,02 EUR/kWh. (VUB, VITO en CEESE, 2005)

³⁴ Deze CO_2 kan opgeslagen worden in lege olie- en aardgasvelden en diepe steenkoollagen. Het nadeel van deze techniek is dat hierdoor de productiekost van waterstof stijgt. (Rifkin, 2002)

De reacties die optreden zijn de volgende: (USDOE, 2007)

Voor vergassing van kolen: $CH_{0,8} + O_2 + H_2O \rightarrow CO + CO_2 + H_2 + \text{andere stoffen}$

Voor biomassavergassing: $C_6H_{12}O_6 + O_2 + H_2O \rightarrow CO + CO_2 + H_2 + \text{andere stoffen}$

In de tweede reactie wordt ter vereenvoudiging glucose gebruikt in de plaats van cellulose. De samenstelling van biomassa varieert sterk, maar biomassa bestaat meestal vooral uit cellulose.

4.4.2 Opslag

De grote uitdaging voor transporttoepassingen op basis van waterstof is hoe men voldoende waterstof kan opslaan in een voertuig om een voldoende grote afstand te kunnen afleggen met één tankbeurt. En dit binnen de beperkingen van kost, gewicht, volume, efficiëntie en veiligheid. De prestaties en de levensduur moeten aangetoond worden. (USDOE, 2007) Een huidige stand van zaken op het gebied van opslag wordt in een samenvattende figuur (figuur 10) op het einde van deze paragraaf getoond.

Waterstof heeft een zeer grote energie-inhoud. In gasvorm bevat het 120 MJ/kg terwijl methaan bijvoorbeeld 50 MJ/kg energie bevat. In vloeibare vorm bevat waterstof ook 120 MJ/kg terwijl ter vergelijking benzine een energie-inhoud van 46 MJ/kg heeft. (VSB, 2007) Volgens Bossel, Eliasson en Taylor (2005) is voor de meeste praktische toepassingen de energiewaarde van gasvormige brandstoffen van weinig belang omdat de meeste opslagtanks beperkt worden door volume, zeker in transporttoepassingen. Het heeft dus meer zin om de energie-inhoud per eenheid volume te bekijken. Omdat waterstof het lichtste gas is – het is 14 keer lichter dan lucht – heeft het een lage energiedichtheid wanneer gekeken wordt in functie van volume. Hierdoor moet het ofwel samengedrukt worden bij zeer hoge druk, of vloeibaar gemaakt worden bij zeer lage temperaturen om in een betekenisvolle hoeveelheid te kunnen worden opgeslagen. Vloeibare waterstof heeft een dichtheid van 70,8 g/l terwijl benzine ter vergelijking 720 g/l dichtheid heeft. (VSB, 2007) Waterstof kan zowel onder vloeibare als gasvormige vorm worden opgeslagen aan boord van het voertuig. Voor gasvormige opslag wordt een druk van 70 MPa of dus 700 bar vooropgesteld. Voor eenzelfde hoeveelheid waterstof is de hogedruktank iets zwaarder dan het vat voor vloeibare waterstof, waardoor het totale voertuiggewicht iets hoger licht bij gasvormige waterstof. Maar omdat het vloeibaar maken en houden van waterstof veel energie vraagt, is de energie-efficiëntie van beide opties ongeveer hetzelfde. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) De volumetrische capaciteit van vloeibare waterstof is 0,07 kg/l, wat toch al meer is dan de opslagcapaciteit van gasvormige waterstof die 0,03 kg/l bedraagt bij een druk van 700 bar. De tanks nemen ook meer ruimte in beslag, waardoor er een verlies is aan kofferruimte tegenover een wagen met een benzinetank. DaimlerChrysler en Nissan hebben beiden al een tank met een druk van 70 MPa of 700 bar gebruikt in enkele voertuigen. (Fuel Cell Today, 2006b)

Tegenwoordig wordt er ook onderzoek gedaan naar cryo-hogedruktanks, tanks die waterstofgas onder hoge druk opslaan bij lage temperaturen rond -120 °C tot -196 °C. Deze tanks zouden relatief lichter kunnen zijn en compacter. (USDOE, 2007) IMPCO onderzoekt een opslagmogelijkheid van waterstof onder hoge druk waarbij verwacht wordt dat de afstand die maximaal kan worden afgelegd 645 km wordt en het extra gewicht beperkt blijft tot 68 kg. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)

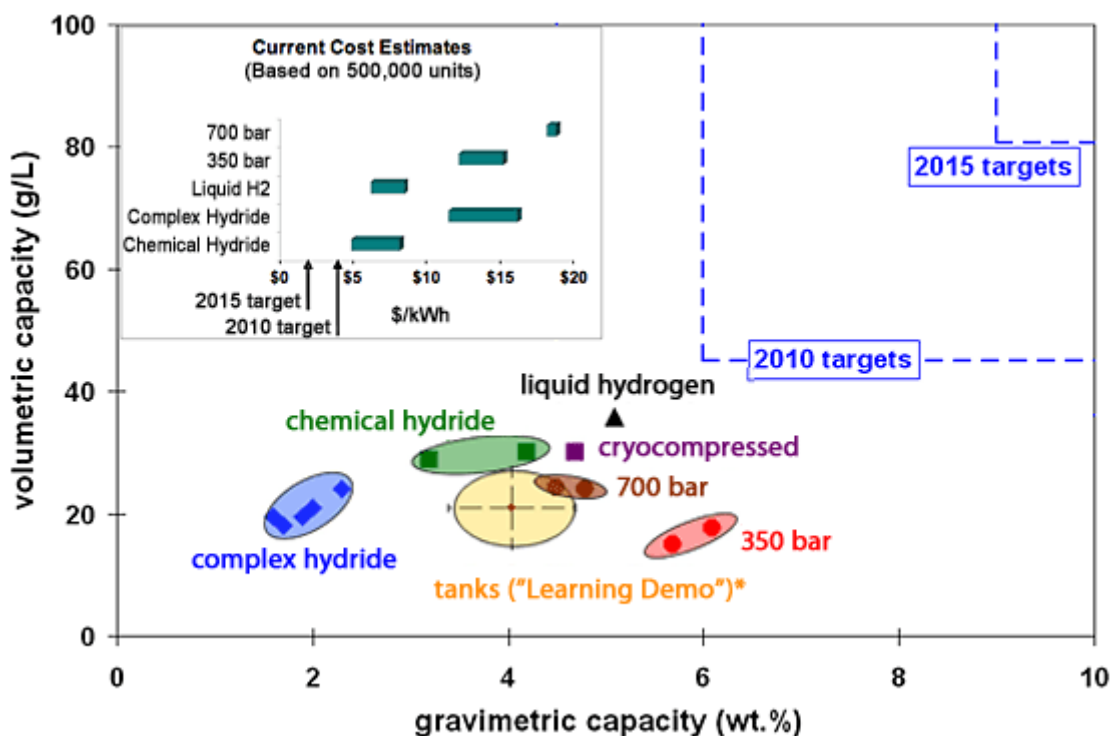
Air Products (2007) verklaart dat de vooruitgang in opslagtechnologie ervoor gezorgd heeft dat waterstof kan opgeslagen worden op een veilige manier onder een hogere druk. Zo wordt de hoeveelheid brandstof die voertuigen aan boord kunnen dragen groter, maar er is wel een hogere kost voor het samendrukken aan de pomp. Air Products ontwikkelt daarom een compressor die aan een lagere kost en met minder onderhoud kan werken dan traditionele compressors. Bovendien zou dit nieuwe ontwerp efficiënter werken.

In een metaalhydride wordt waterstof chemisch gebonden aan de atomen van een metaal. De meest gebruikte metalen zijn legeringen van Mg (magnesium), Ni (nikkel), Fe (ijzer) en Ti (titaan). Tijdens het insluiten van de waterstof wordt er warmte afgegeven. (VSB, 2007) Wanneer deze metaalhydrides opgewarmd worden laten ze de ingesloten waterstof weer vrij. Het nadeel van deze metaalhydrides is dat er veel energie ingestoken moet worden. In brandstofceltoepassingen kan echter de restwarmte van de brandstofcel gebruikt worden. (Bossel, Eliasson en Taylor, 2005) Bovendien zijn ze nogal zwaar, wat een significant nadeel is in transporttoepassingen. (General Motors, 2007) Per 100 g hydride kan er in het beste geval 7 g waterstof worden opgeslagen. Meestal echter, wordt er slechts 2 à 3 % van het gewicht van het metaalhydride vastgehouden. Daarbij komt nog de kost van het hydride: 4 USD/lb volgens JRC, IPTS en ESTO (2003b) wat overeen komt met ongeveer 6 EUR/kg. Momenteel wordt de waterstof nog te traag losgelaten om nuttig te zijn in voertuigtoepassingen. Oy Hydrocell (2007) heeft brandstofcellen ontwikkeld die intern zijn uitgerust met metaalhydride opslag. Het bedrijf noemt de opslag door metaalhydrides zeer veilig. Bovendien is het een gemakkelijke manier om waterstof te transporteren en te gebruiken. De gebruikte druk bedraagt slechts 2 tot 4 bar. De opgeslagen waterstof kan jaren worden opgeslagen, zonder dat er verloren gaat. Bovendien is de opgeslagen waterstof zeer zuiver, omdat waterstof het enige is dat in de hydrides kan worden gestockeerd. Ook Ovonic (2007) heeft brandstofcellen met een interne metaalhydride opslag.

Waterstof kan ook opgeslagen worden in chemische hydrides. Hier komt de opgeslagen waterstof weer vrij door middel van chemische reacties. Er is al een opslag van waterstof verwezenlijkt die 11 % bedraagt van het gewicht van de chemische hydride. (USDOE, 2007) Deze hydrides reageren sterk met water en laten dan warmte en waterstof vrij. Bovendien wordt er in de reactie met water nog extra waterstof gevormd doordat het water zelf nog reageert. (Bossel, Eliasson en Taylor, 2005)

Een andere opslagmogelijkheid zijn koolstof nanotubes. Dit zijn kleine koolstofbuisjes. Volgens General Motors (2007) moet een betrouwbare productie van dergelijke buisjes nog worden aangetoond. Bovendien kunnen deze koolstofnanotubes volgens het onderzoek van deze autoconstructeur slechts een tiende van de vooropgestelde hoeveelheid waterstof vasthouden, wat neer komt op 0,7 % van het volume van het buisje. Het US departement van Energie (2007) meldt dat opslag tot 3 % van het gewicht is aangetoond. Er zijn zeker nog verdere verbeteringen nodig en er moeten processen ontwikkeld worden om een hoog volume van deze nanotubes tegen een lage kost te produceren voordat ze economisch geschikt zijn om in voertuigen gebruikt te worden.

Nieuwe methodes die onderzocht worden om waterstof op te slaan zijn metaaloxideverbindingen, die kristallijn zijn en microporeus. Deze zouden bij een temperatuur van $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 % van hun gewicht aan waterstof kunnen vasthouden. Maar omdat ze zo poreus zijn, kan volumetrische capaciteit nog voor problemen zorgen. Ook geleidende polymeren worden als een mogelijkheid genoemd, evenals nanostructuren die via nieuwe processen zoals sonochemie³⁵ kunnen geproduceerd worden. (USDOE, 2007)



Figuur 10: Huidige stand van zaken wat betreft opslag (USDOE, 2007)

³⁵ Sonochemie is een moderne technologie, die gebruik maakt van ultrasone geluidstrillingen en die door wetenschappers en ingenieurs wereldwijd wordt gezien als een zeer milieuvriendelijke procestechologie. Volgens Alpha (2007) wordt deze technologie vooral gebruikt wanneer procesoptimalisatie, efficiëntie en kwaliteit een belangrijke rol spelen.

In figuur 10 wordt er een overzicht gegeven van verschillende opslagmethodes en hun respectievelijke geschatte kosten wanneer ze in grote hoeveelheden (500 000 eenheden) zouden geproduceerd worden. Het USDOE wil de opslagkost van waterstof tegen 2010 verlagen tot ongeveer 4 USD/kWh. Chemische hydrides en vloeibare waterstof zitten daar volgens de figuur momenteel het dichtst bij. Wat de opslagcapaciteit van de verschillende technologieën betreft, moeten er nog grote inspanningen verricht worden om de doelstellingen van 2010 en 2015 te bereiken.

4.4.3 Distributie

Door zijn lage dichtheid is waterstof moeilijker te vervoeren dan bijvoorbeeld aardgas of benzine. (Wurster, 2005a) Tegenwoordig wordt waterstof vaak via pijpleidingen getransporteerd. Via de weg wordt het vooral vervoerd in tanks onder hoge druk of vloeibaar in cryogenische tanks. Het uitbouwen van een pijpleidingennetwerk voor waterstof op grote schaal zou zeer kostelijk zijn. Bovendien is hiervoor een Europees raamwerk nodig om veiligheid en aanvaarding door het publiek te bewerkstelligen. Ook onder vloeibare vorm heeft waterstof een lage energie-inhoud wat implicaties op het wegtransport heeft. Er zouden namelijk vijf maal zoveel vrachtwagens nodig zijn om dezelfde energie-inhoud te leveren als één vrachtwagen met conventionele brandstof. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Volgens Bossel, Eliasson en Taylor (2005) zijn dit zelfs vijftien vrachtwagens. In België is een tamelijk uitgebreid ondergronds pijpleidingennetwerk voor waterstof aanwezig. In totaal is er een netwerk – uitgebaut door Air Liquide – van meer dan 800 km aanwezig dat zich uitstrekt van het noorden van Frankrijk tot de haven van Rotterdam. (VSB, 2007)

Het neemt ongeveer 3 jaar tijd in beslag om een tankstation vanuit het plan- en bouwstadium via een testfase en optimalisatie van de technologie helemaal klaar te maken voor gebruik. Vandaag zijn er al verschillende tankstations voor waterstof beschikbaar, bijvoorbeeld in Berlijn. Hier worden ze uitgebreid getest. Om tanks met gasvormige waterstof onder een druk van 700 bar te kunnen vullen, moet deze hoge druk-technologie ook aan de pompen worden toegepast. (DaimlerChrysler, 2007)

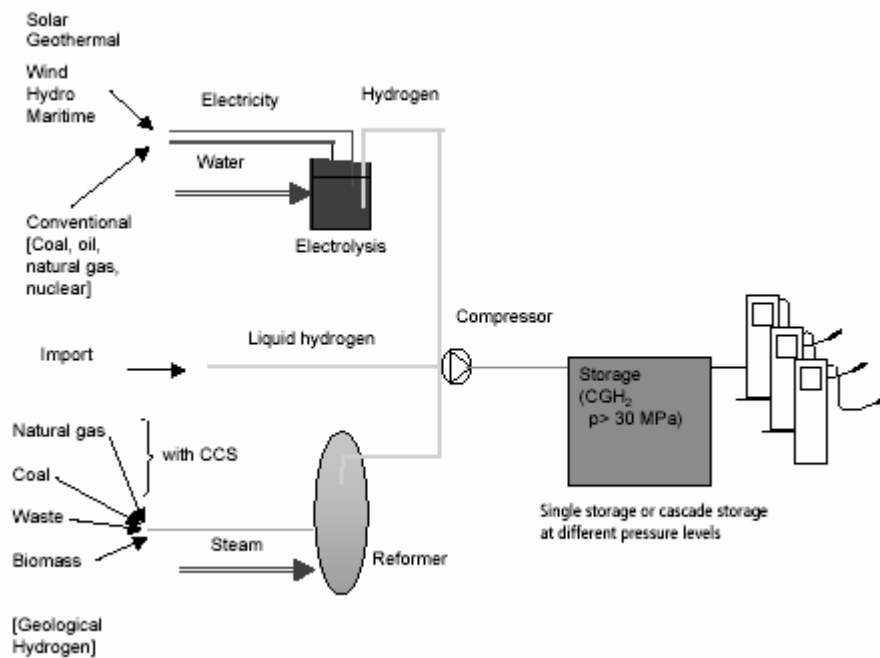
De firma HydroThane wil tankstations plaatsen om voertuigen van een mengsel van waterstof en aardgas te kunnen voorzien. Deze infrastructuur kan op termijn ook gebruikt worden om pure waterstof te verdelen. (HydroThane, 2007)

Het nadeel dat er geen tankinfrastructuur aanwezig is voor waterstof en dat het enorme investeringen zal kosten om die beschikbaar te maken, moet in het juiste perspectief worden bekeken. Volgens een studie van General Motors (2007) zou er 15 GUSD nodig zijn om een

waterstoftankinfrastructuur uit te bouwen in de Verenigde Staten, maar er wordt door de Verenigde Staten wel jaarlijks 5 GUSD besteedt aan de uitbreiding van het aardgasnetwerk en zelfs 11 GUSD aan het onderhoud van tankstations door de olie-industrie.

4.4.4 Voor- en nadelen van waterstof en van de waterstofverbrandingsmotor

Waterstof kan een belangrijk alternatief zijn voor de conventionele brandstoffen om verschillende redenen. Het kan in verschillende toepassingen gebruikt worden, zoals brandstofcellen of een verbrandingsmotor. Bovendien kan waterstof geproduceerd worden via elektrolyse met elektriciteit die afkomstig is van niet-fossiele bronnen waardoor het zeer milieuvriendelijk is en de mogelijkheid biedt om een nuluitstoot met zich mee te brengen. (Pecqueur, 2007a; Fuelcells2000, 2007) De productie van waterstof zal steeds goedkoper worden naargelang er meer geproduceerd wordt. (Rifkin, 2002) Hierdoor loont het de moeite om in de productietechnologieën te investeren. Wurster (2005a) prijst de flexibiliteit van mogelijke bronnen die kunnen gebruikt worden om waterstof te produceren aan. Deze veelzijdigheid wordt getoond in figuur 11.



Figuur 11: Mogelijke bronnen voor waterstofproductie (Wurster, 2005b)

Waterstof kan gebruikt worden in een vonkontstekingsmotor. Het mengsel moet wel ontstoken worden, want de zelfontbrandingstemperatuur van waterstof is te hoog. Er zouden dan te hoge compressieverhoudingen nodig zijn. Waterstof kan in een zeer breed gebied van brandstof-luchtmengsels verbrand worden omdat het een zeer breed ontstekingsgebied heeft. De waterstofmotor werkt zowel bij een arm als een rijk mengsel. Bij een mager mengsel is de verbranding vollediger,

de temperatuur lager en de uitstoot van NO_x lager, maar ook het vermogen is lager. Bij rijkere mengsels wordt er meer NO_x gevormd. Waterstofverbrandingsmotoren zijn de enige verbrandingsmotoren die geen CO₂ uitstoten. De belangrijkste uitstoot is waterdamp, met daarnaast nog NO_x en geringe hoeveelheden CO en KWS. De NO_x-uitstoot kan verder gereduceerd worden door een naverbranding. Bij de conversie moeten er wel verschillende aanpassingen aan de motor gebeuren. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Het rapport vermeldt verder dat verbrandingsmotoren aangedreven door waterstof op kortere termijn beschikbaar zullen zijn en tegen een lagere kost dan brandstofcelvoertuigen.

Voordelen waterstofverbrandingsmotor: (Van Mierlo et al., 2006)

- Er kan een zeer snelle verbranding door het hogere thermische rendement plaatsvinden.
- De belasting wordt geregeld door aanpassing van de rijkheid van het brandstofluchtmengsel in plaats van met de gasklep. Zo vindt er geen obstructie door de gasklep plaats en geen ladingsverliezen en is er bovendien een hoger rendement.
- Er is een hogere compressieverhouding mogelijk, waardoor het theoretisch rendement hoger ligt.
- Het is een gekende technologie. (Pecqueur, 2007a)
- Conventionele motoren kunnen aangepast worden tot waterstofverbrandingsmotoren. (Pecqueur, 2007a)
- Er is grote flexibiliteit mogelijk. Waterstof kan bijvoorbeeld in verschillende verhoudingen bij aardgas worden bijgemengd. (Pecqueur, 2007a) Dit wordt verder nog toegelicht.

De eerste drie voordelen zorgen ervoor dat het totale rendement van een waterstofverbrandingsmotor hoger is dan van een benzineverbrandingsmotor.

Het gebruik van waterstof heeft echter ook belangrijke nadelen:

- Vloeibaar waterstof vereist zeer lage temperaturen van 20 K, of - 253 °C. Hierdoor moet er veel energie toegevoerd worden om de waterstof vloeibaar te maken en te houden. (VSB, 2007) Deze lage temperatuur zorgt voor aanzienlijke verliezen in de tank doordat er constant waterstof verdampt. Dit noemt men "boil-off". Wurster (2005a) zegt dat het energieverlies bij vloeibaar maken van waterstof ongeveer 30 % bedraagt. Lange termijn opslag geeft sowieso problemen omdat enige indringing van warmte niet kan vermeden worden. Bovendien zijn er geleidelijke waterstofverliezen uit de tank als het voertuig een tijd niet gebruikt wordt. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) Volgens Bossel, Eliasson en Taylor (2005) zou het verlies aan waterstof ongeveer 50 % zijn na 14 dagen.
- De opslag onder hoge druk gaat gepaard met grote verliezen door compressie.
- Wanneer aardgas wordt gebruikt voor de productie van waterstof zijn de broeikasgasemissies van het voertuig met een waterstof vonkontstekingsmotor hoger dan bij het gebruik van conventionele brandstoffen. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004)

- Lage energiedichtheid; bij 200 bar is er 22 liter gasvormige waterstof nodig om het equivalent van de verbrandingswaarde van 1 liter benzine te halen; bij vloeibare waterstof is dit 10 liter voor 1 liter benzine en waterstof in metaalhydriden vereist 11 liter voor 1 liter benzine. Vloeibare waterstof heeft dus de grootste energiedichtheid, maar het vloeibaar maken vereist veel energie en leidt bovendien tot vrij hoge verdampingsverliezen. (Emis, 2007)
- Zowel de productie, distributie als opslag van waterstof gaan gepaard met energieverliezen. Hierdoor is er veel meer energie nodig om een waterstofeconomie te onderhouden dan voor fossiele brandstoffen. (Bossel, Eliasson en Taylor, 2005) De vraag is of dit een geldig argument is, want fossiele brandstoffen raken uitgeput. Het is dus onzeker of hiermee wel een vergelijking mag gemaakt worden.
- Er is geen bestaande tankinfrastructuur. (Emis, 2007)
- Enkel het gebruik van niet-fossiele bronnen voor de productie van waterstof zorgt voor een vermindering van de broeikasgasemissies. Maar deze hernieuwbare bronnen zoals wind-, nucleaire en zonne-energie zijn zeer duur. Bovendien kunnen deze meer efficiënt gebruikt worden door de geleverde elektriciteit direct te gebruiken. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004)
- Het gebruik van pijpleidingen voor waterstof is een uitdaging omdat waterstof zulke kleine atomen heeft dat het gemakkelijk gaat lekken. De bestaande aardgaspijpleidingen kunnen niet gebruikt worden, maar moeten aangepast worden. Een mengsel van aardgas en waterstof kan eventueel wel via de bestaande pijpleidingen vervoerd worden, met slechts kleine aanpassingen. Beide opties – puur waterstof of een mengsel vervoeren – worden momenteel uitgebreid onderzocht. (USDOE, 2007)
- Er moet ook rekening gehouden worden met de aanvaarding van de nieuwe technologie door de consument. Deze hangt zowel samen met de aankoopkost van het voertuig als met de brandstof- en onderhoudskosten. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004)

Het vooroordeel dat waterstof gevaarlijk is, wordt door crashtests tegengesproken. Bij een brand ontstaat er een kortstondige steekvlam, maar wordt het interieur van de wagen nauwelijks verhit. (Van Mierlo et al., 2006) De vlam is bleekblauw en bijna onzichtbaar in daglicht. Een waterstofvuur verspreidt weinig warmte vergeleken met een benzinebrand. (Plug Power, 2007) In een aantal opzichten is waterstof toch minder veilig als andere brandstoffen; de leksnelheden en vlamsnelheden zijn hoger en de ontstekingsgrenzen wijder. In andere opzichten is waterstof echter veiliger. De ontstekingconcentraties moeten groter zijn en de waterstof diffundeert en verdampt veel sneller. Aangezien deze effecten elkaar grotendeels compenseren, is waterstof wat veiligheid betreft vergelijkbaar met LPG. (Emis, 2007) Dat waterstof de naam heeft om gevaarlijk te zijn, valt te verklaren door het feit dat de waarden waarbinnen een mengsel van waterstof en lucht

ontvlambaar is tussen 4 en 75 vol %³⁶ gelegen zijn. Dit is een zeer breed gebied. Bovendien is de ontstekingsenergie bij waterstof zeer klein, 0,02 mJ. (VSB, 2007) Waterstof is reukloos en een lek kan dus niet zomaar gedetecteerd worden door de menselijke neus. Maar vermits geen enkel geuradditief licht genoeg is om met dezelfde snelheid op te stijgen als waterstof (met een snelheid van 20 m/s), is het voorlopig onmogelijk om er een geurstof aan toe te voegen. Bovendien kunnen additieven de werking van een brandstofcel verstoren. (USDOE, 2007) Waterstof bevat geen koolstof, dus er is geen gevaar voor CO-vergiftiging. (Hydrogen and Fuel Cells Canada, 2007)

Van Mierlo et al. (2006) verklaren dat de omschakeling van een benzinemotor naar een waterstofverbrandingsmotor geleidelijk kan gebeuren, namelijk via bi-fuel (waterstof - benzine) verbrandingsmotoren. BMW heeft bijvoorbeeld de Hydrogen 7 bi-fuel sedan geproduceerd die kan rijden op benzine of waterstof. De waterstof wordt opgeslagen in vloeibare vorm in een zeer goed geïsoleerde tank, die het gewicht van de wagen met ongeveer 15 % laat toenemen. Er zijn extra veiligheidsmaatregelen ingebouwd om waterstof dat verdampt te laten ontsnappen wanneer de druk te hoog wordt. Enkele journalisten mochten de wagen gaan testen in Berlijn. Uiteindelijk wil BMW een vloot met honderd van dergelijke voertuigen bouwen. Ook het tanken van vloeibare waterstof werd gedemonstreerd en uitgetest. Dit neemt iets meer tijd in beslag dan het tanken van diesel of benzine en duurt ongeveer 8 min. BMW wil via deze hybride technologie de efficiëntie van de conventionele aandrijfvormen verbeteren. (BMW, 2007) Met de snelste technologie kan gasvormige waterstof al getankt worden op 2 min tijd volgens DaimlerChrysler (2007).

HydroThane wil de brandstof HydroThane commercialiseren en tankstations plaatsen die deze brandstof kunnen leveren. Deze brandstof bestaat uit een mengsel van aardgas en waterstofgas, met minimaal 20 % waterstof erin. Tot 40 % waterstof kan worden toegevoegd zonder dat er wijzigingen aan de motor nodig zijn. Het grote voordeel van deze menging is dat de uitstoot veel properder is dan zelfs de Euro 5-norm zal zijn. Het bijkomende voordeel van de uitbouw van deze tankinfrastructuur is dat wanneer de waterstofverbrandingsmotor of de brandstofcel economisch geproduceerd kunnen worden, de tankinfrastructuur voor waterstof al aanwezig is. Dit bevordert een geleidelijke introductie van waterstof in de maatschappij. (HydroThane, 2007) De firma heeft samen met de Karel de Grote-Hogeschool in Antwerpen een Citroën Berlingo omgevormd tot een voertuig dat voor 100 % op waterstof rijdt. Door gebruik te maken van een mengsel kan de samenstelling van het mengsel afgestemd worden op de aanvoer van waterstof. Wanneer er veel waterstof voorhanden is, kan het mengsel veel waterstof bevatten, bij een laag waterstofaanbod minder. (Pecqueur, 2007b) Naast een rechtstreeks gebruik in een verbrandingsmotor, kan waterstof ook gebruikt worden om voertuigen die uitgerust zijn met een brandstofcel aan te drijven. Dit wordt verder besproken onder de paragraaf 4.8.3 Brandstofcellen.

³⁶ Een vol% of (massa)volumepercent wordt gedefinieerd als 1 g opgeloste stof, in 100 g oplossing. (Put, 2006) Een oplossing met een 4 vol% betekent dat er in 100 g lucht-waterstofmengsel 4 g waterstof aanwezig is.

4.5 Biobrandstoffen

Biobrandstoffen worden geproduceerd uit landbouwgewassen, hout of organisch afval. Het zijn hernieuwbare brandstoffen. (Van Mierlo et al., 2006) Ze hebben het voordeel dat ze compatibel zijn met conventionele aandrijfvormen. Tegen het einde van 2010 wil de Europese Commissie dat biobrandstoffen een aandeel van 5,75 % innemen in de totale hoeveelheid gebruikte transportbrandstoffen. Op korte termijn moeten biodiesel, bio-ethanol en puur plantaardige olie deze belangrijke taak vervullen.

Biobrandstoffen zijn in theorie CO₂-neutraal. De planten nemen CO₂ op als ze groeien en zetten die om in energierijke biomassa. Die CO₂ komt wel opnieuw vrij bij verbranding in de voertuigmotor. (Van Mierlo et al., 2006; Louyet en Convié, 2006)

Meestal wordt bij de productie van biodiesel uitgegaan van plantaardige oliën zoals koolzaadolie, zonnebloemolie, palmolie of sojaolie. Ook vetten kunnen gebruikt worden. Biodiesel heeft een iets hogere dichtheid en viscositeit dan gewone diesel. De calorische waarde of energie-inhoud ligt wel iets lager. Biodiesel kan in pure vorm gebruikt worden, waardoor er een paar kleine aanpassingen nodig zijn aan de gewone dieselmotor, zoals het voorzien van brandstofleidingen en dichtingen in een geschikt materiaal om het aantasten van rubber te vermijden. Rubber kan namelijk na verloop van tijd opzwellen en er kunnen lekken ontstaan. Biodiesel kan ook vermengd worden met gewone diesel. (CONCAWE, EUCAR, JRC, 2004; Emis, 2007) Voertuigen op pure biodiesel zullen meer NO_x uitstoten dan wagens op conventionele diesel, namelijk ongeveer 10 %, maar minder PM, CO en koolwaterstoffen, die doorgaans 50 % dalen. (Van Mierlo et al., 2006) De uitstoot van SO₂ blijft ongeveer hetzelfde. De indirecte emissies van PM en SO₂ nemen toe door het landbouwproces, wat het voordeel van de lagere directe uitstoot voor een groot deel teniet doet. De emissie van broeikasgassen neemt in het totaal met 40 tot 60 % af door de opname van CO₂ tijdens het productieproces. (Emis, 2007; Van Mierlo et al, 2006)

Om puur plantaardige olie te gebruiken, dient de dieselmotor speciaal omgebouwd te worden. De kost van de ombouw ligt tussen 2 000 en 3 000 EUR. Het voordeel tegenover biodiesel is dat het productieproces eenvoudiger is, waardoor de brandstof niet alleen goedkoper is, maar er ook minder broeikasgassen vrijkomen bij productie, door het lagere verbruik van fossiele energie. De motorwerking zou waarschijnlijk sterk beïnvloed worden waardoor de emissies vermoedelijk zouden stijgen.

Bio-ethanol is vooral geschikt voor vonkontstekingsmotoren door zijn hoge octaangetal. Voor concentraties boven 20 % die bijgemengd zijn bij gewone benzine moeten er aanpassingen aan de wagen gebeuren. De materialen in het brandstofsysteem moeten aangepast worden en de inspuithoeveelheid moet verhoogd worden door de lagere verbrandingswaarde³⁷ van ethanol.

Ethanol heeft het nadeel dat de koude starteigenschappen zeer slecht zijn en dat het metalen, kunststoffen en smeermiddelen aantast. (Emis, 2007) Er zijn reeds twee "Flex(ible) Fuel"-Voertuigen (FFV) op de markt die kunnen rijden op elke samenstelling van benzine en ethanol, namelijk de Ford Focus FFV en de Saab 95 FFV. Van Mierlo et al. (2006) vermelden dat de emissiereductie die wordt bewerkstelligd door het gebruik van ethanol niet eenduidig is. De productie vereist veel energie, maar de precieze hoeveelheid is afhankelijk van de gebruikte grondstof. Ethanol uit graan of maïs vermindert de uitstoot met 30 à 40 % ten opzichte van benzine. Bij het gebruik van suikerbiet, ligt de reductie hoger. De grootste barrière voor het wijdverbreid gebruik van ethanol als brandstof is zijn kost. Zelfs met belastingvoordelen voor ethanolproducenten blijft ethanol duurder dan benzine, volgens JRC, IPTS en ESTO (2003a). Bovendien heeft ethanol een lagere energie-inhoud, zodat er meer brandstof vereist is om dezelfde afstand af te leggen. Hierdoor wordt ethanol relatief nog duurder. ETBE, ethyltertiairbutylether, wordt gemaakt uit bio-ethanol en is minder vluchtig, waardoor er minder verdampingsemissies optreden. Bij toevoeging van kleine hoeveelheden alcoholen aan benzine (tussen 10 % en 22%) gebeurt de verbranding vollediger waardoor de uitstoot van KWS, CO en NO_x daalt.

Biobrandstoffen worden geproduceerd uit planten die kunstmest en bestrijdingsmiddelen vereisen, halen Van Mierlo et al. (2006) aan. Hierdoor moet de milieuvriendelijkheid gerelativeerd worden. De landbouw- en productieprocessen vragen ook veel energie waardoor er bijkomende emissies ontstaan. Zo komt er tijdens het landbouwproces N₂O vrij. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) Dit gas heeft een zeer sterk broeikaseffect – 300 keer groter dan het effect van CO₂, zoals vermeld in hoofdstuk 3 – waardoor zelfs kleine emissies een significant effect hebben op de broeikasgasbalans. De uitstoot van N₂O varieert sterk van het ene veld ten opzichte van het andere, afhankelijk van het klimaattype, het soort gewas en de hoeveelheid bemesting. Bovendien zijn er grote landbouwoppervlaktes nodig en deze zijn beperkt in België. Om één wagen een jaar te laten rijden, is ongeveer één hectare landbouwgrond nodig. De afhankelijkheid van fossiele brandstoffen wordt wel verminderd. (Louyet en Convié, 2006) CONCAWE, EUCAR en JRC (2004) voegen hieraan toe dat de kosten-baten verhouding naast de productiemethode ook sterk afhankelijk is van het gebruik van de bijproducten. Bijproducten worden vaak gebruikt op de voor de producent meest economische manier. Dit is niet noodzakelijk het gebruik dat de CO₂-uitstoot minimaliseert.

³⁷ De verbrandingswaarde is de hoeveelheid warmte die kan vrijkomen bij verbranding van een bepaalde stof. (Franco, 2006)

Vloeibare alternatieve brandstoffen hebben drie grote voordelen ten opzichte van de gasvormige alternatieven. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Ze vereisen geen speciale infrastructuur, wanneer ze gemengd worden met conventionele brandstoffen. Ook wanneer ze in pure vorm gebruikt worden, hebben ze eenvoudigere aanpassingen aan de infrastructuur nodig dan gasvormige brandstoffen. Ook de aanpassingen die aan de voertuigen moeten gebeuren zijn kleiner dan bij het gebruik van gassen. Ten slotte kunnen de vloeibare alternatieve brandstoffen in mengsels met conventionele brandstoffen gebruikt worden in verschillende hoeveelheden naargelang hun beschikbaarheid.

4.6 Andere brandstoffen

Enkele andere brandstoffen zijn dimethylether, synthetische brandstoffen en aquazole, die hier vermeld worden ter volledigheid. Dimethylether of DME wordt gemaakt uit methanol en kan bijgevolg zowel uit aardolie als uit kolen, aardgas en biomassa geproduceerd worden. Deze brandstof kan het best gebruikt worden in dieselmotoren, het ombouwen is vrij eenvoudig. De voertuigtank moet groter worden en het brandstofsysteem moet worden aangepast aan het grotere volume van de brandstofstroom omdat de energie-inhoud van DME ten opzichte van diesel kleiner is. De efficiëntie ligt ongeveer even hoog, maar de uitstoot van fijn stof is significant kleiner. DME is schadelijk voor de meeste kunststoffen en rubbers zodat andere materialen moeten gebruikt worden voor dichtingen. Transport, opslag en distributie van DME zijn analoog aan die van LPG. (Emis, 2007) Omdat naast het ombouwen van de motor ook nieuwe distributienetwerken – vergelijkbaar met de infrastructuur die LPG vereist – en tankgelegenheden nodig zijn, brengt DME een hoge implementatiekost met zich mee. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004)

Synthetische brandstoffen worden gemaakt uit koolstofhoudende brandstoffen via een proces dat Fischer-Tropsch wordt genoemd. Dit gebeurt via een tussenstap waarin het synthesesgas, een mengsel van CO en H₂, wordt omgezet in vloeibare producten. Deze basisbrandstof kan aardgas zijn – dan wordt het proces Gas-to-Liquid genoemd – of kool, waarbij men dan van Coal-to-Liquid spreekt, of biomassa, wat Biomass-to-Liquid wordt genoemd. Volgens Emis (2007) is synthetische diesel het meest economische eindproduct. Deze brandstof kan direct gebruikt worden in dieselmotoren, maar best worden er additieven toegevoegd om de smerende eigenschappen wat te verhogen om slijtage tegen te gaan. Het rendement van de motor ligt normaalgezien iets hoger dan bij gewone diesel en de emissies 10 tot 20 % lager. Bij het Coal-to-Liquid proces liggen de emissies aanzienlijk hoger dan bij conventionele diesel. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006)

Tegenwoordig worden er nieuwe processen ontwikkeld om synthetische diesel te produceren uit biomassa. Deze zorgen voor een vermindering van de broeikasgasemissies, maar vergen veel energie. Deze processen hebben het potentieel om veel meer broeikasgassen te sparen dan de

huidige biobrandstoffen. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Fischer-Tropsch processen zijn duur en complex. Ze halen een groot voordeel uit schaalvoordelen. Bij het toepassen van dit proces zal de dieselfractie in de praktijk niet groter zijn dan 75%. Verder wordt er vooral Naphta gevormd en een beetje LPG.

Aquazole is een mengsel van diesel en water. De voordelen van het mengen zijn: (Emis, 2007)

- Er heerst een lagere temperatuur in de motor.
- De NO_x emissies dalen met 15 tot 30 %.
- De deeltjesemissies zijn lager, 10 tot 50 % zelfs.
- Er is een hogere compressieverhouding mogelijk.
- De bezinksels in de motor worden verminderd.

Het nadeel is dat het een instabiel mengsel is. Het energieverbruik ligt 1 tot 4 % lager dan bij gewone diesel, maar het gebruik in liters is wel hoger door de lagere energiedichtheid.

Synthetische brandstoffen, aquazole en biobrandstoffen hebben enkele voordelen tegenover gasvormige brandstoffen. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004)

- Er is geen speciale distributie-infrastructuur nodig.
- Er zijn weinig of geen aanpassingen nodig aan bestaande en nieuwe voertuigen.
- Omdat ze mengbaar zijn met conventionele brandstoffen, kunnen ze gebruikt worden in verschillende verhoudingen in functie van hun beschikbaarheid in een bepaald gebied in een bepaalde periode.

Nadelig is wel dat deze brandstoffen zeer energie-intensief zijn en duur ten opzichte van conventionele brandstoffen.

4.7 Traditionele aandrijfvormen

4.7.1 Benzinemotor

De vonkontstekingsmotor, ook wel Otto-motor genoemd, wordt toegepast in benzinevoertuigen. Tijdens de aanzuigslag wordt een mengsel van lucht en brandstof in de cilinder gebracht. Op het einde van de compressieslag wordt dit mengsel tot verbranding gebracht door een vonk afkomstig van de ontstekingskaars. Deze verbranding zorgt ervoor dat de zuiger zijn arbeidsslag kan uitvoeren. De verbrandingsgassen worden uit de cilinder verwijderd en de cyclus kan opnieuw doorlopen worden. Om het verbrandingsproces beter te kunnen controleren en dus de prestaties van de motor te verhogen, wordt er gewerkt met een brandstofinjectiesysteem. (Emis, 2007)

LPG voertuigen zijn meestal omgebouwde benzinevoertuigen voor personenwagens waarbij de LPG-installatie vaak wordt geïnstalleerd naast het oorspronkelijke brandstofsysteem. Vonkontstekingsmotoren zijn geschikt voor het gebruik van LPG. (Emis, 2007)

Ook aardgasvoertuigen gebruiken vonkontstekingsmotoren. Er zijn ook drukregelaars nodig in een aardgassysteem om de opslagdruk van 200 bar te verminderen tot een druk die in de motor bruikbaar is, namelijk van 0 tot 8 bar. (Emis, 2007) Ethanol, methanol, synthetische benzine en waterstof kunnen eveneens gebruikt worden in een vonkontstekingsmotor. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)

4.7.2 Dieselmotor

In dieselmotoren, ook wel compressieontstekingsmotoren genoemd, wordt de temperatuur in de verbrandingskamer zo sterk opgevoerd dat de brandstof spontaan ontbrandt. Bij het starten van een dieselmotor wordt de verbrandingskamer voorgegloeid omdat de verbrandingskamer dan nog te koud is voor spontane ontbranding. Wanneer de motor draait, is de verbrandingskamer warm genoeg en wordt de gloeiplug uitgeschakeld. Dieselmotoren zijn meestal zwaarder dan benzinemotoren, waardoor de levensduur langer is en de onderhoudskosten lager liggen. Ze zijn groter en meer lawaaierig, maar ook zuiniger en duurzamer. De geluidsproductie is sterk verlaagd bij de nieuwere dieselmotoren. Veel dieselmotoren zijn voorzien van een druklader of turbo. Een druklader gebruikt energie uit de uitlaatgassen om meer lucht in de verbrandingskamer te krijgen. Wanneer er dan ook meer brandstof ingespoten wordt, wordt hierdoor het vermogen van de motor verhoogd. (Emis, 2007) Het verschil met de vonkontstekingsmotor bestaat hierin dat in de dieselmotor de lucht eerst wordt samengedrukt en de brandstof pas daarna geïnjecteerd wordt, terwijl in de vonkontstekingsmotor het lucht-brandstofmengsel ontstoken wordt. In de dieselmotor wordt bovendien geen vonk gebruikt om het mengsel te ontsteken. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)

De mogelijke brandstoffen die in een compressieontstekingsmotor kunnen gebruikt worden zijn: diesel, biodiesel, DME of dimethylether, synthetische diesel en dual-fuel, namelijk een combinatie van ethanol en diesel of van aardgas en diesel. (JRC; IPTS en ESTO, 2003a)

4.8 Alternatieve aandrijfvormen

Naast alternatieve brandstoffen te gebruiken, kunnen de schadelijke emissies ook verminderd worden door alternatieve technieken te gebruiken om de wagen aan te drijven. Of een alternatieve aandrijfvorm een commercieel succes wordt is afhankelijk van technische prestaties – het moet namelijk werken – de aanwezigheid van een geschikte tank-infrastructuur en van de aanvaarding door het publiek. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Andere factoren die de invloed van een wagen op

het milieu beïnvloeden zijn rijgedrag, onderhoud en bandenspanning. VUB, VITO en CEESE (2005) Op deze effecten kan ook ingespeeld worden om de negatieve invloed van een voertuig op het milieu te verminderen.

Er zijn verschillende redenen om nieuwe technologieën aan te moedigen.

- a) Om het maatschappelijk optimum te bereiken, zouden de externe kosten in rekening moeten worden gebracht. De kost van een technologie voor het milieu bijvoorbeeld en de prijs die ervoor betaald wordt zijn niet gelijk. Er kunnen nieuwe technologieën ontwikkeld worden die minder schade aanbrengen aan de natuur. Deze kunnen dan bijvoorbeeld gesubsidieerd worden voor de waarde van de vermeden externe kost om het gebruik ervan aan te moedigen.
- b) Wanneer een technologie veel gebruikt wordt, zullen de kosten ervan dalen. In het begin kan de overheid een deel van de hoge kost van een nieuwe technologie financieren zodat de technologie meer gebruikt wordt. Daarna zal de kost dalen en kan de technologie concurrentieel worden met de conventionele technologieën. Bovendien wordt verwacht dat de brandstofprijzen gaan stijgen, waardoor de nieuwe technologieën sneller concurrentieel worden. Indien er een nieuwe technologie voorhanden is, is de goedkoopste manier om over te schakelen als iedereen gelijktijdig overschakelt. Maar zelfs indien iedereen wel wil overschakelen, kan het zijn dat niemand die werkelijk doet omdat de kosten eenvoudigweg te hoog zijn voor de eerste die dit daadwerkelijk doet. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Deze persoon kan ook niet zeker weten of anderen hem hier wel in zullen volgen. Een technologie wordt pas goedkoper wanneer hij gebruikt wordt. Hier kan dus regulering eventueel een oplossing bieden. Regulering kan zowel dienen als een coördinerend mechanisme als als een dwingend mechanisme om het publiek te verplichten een bepaalde technologie aan te nemen. In de auto-industrie wordt dit toegepast door emissienormen op te leggen. Hierdoor worden autoconstructeurs verplicht om te investeren in technologieën die meer milieuvriendelijk zijn. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)
- c) Wanneer de aarde opwarmt, zullen de ontwikkelingslanden sterker getroffen worden dan de ontwikkelde landen, hoewel de ontwikkelde landen meer verantwoordelijk zijn voor de uitgestoten broeikasgassen. Bovendien heeft de opwarming van de aarde effecten op lange termijn. Wanneer er rekening gehouden wordt met de transgenerationale solidariteit, moet er nu iets gedaan worden aan de uitstoot van de broeikasgassen. Ook dit is bijgevolg een reden om nieuwe technologieën te gebruiken. Zo kan de opwarming van de aarde misschien toch binnen de perken worden gehouden.

- d) Zoals bij de meeste technologieën, geldt ook bij de brandstofcellen dat hoe meer eenheden geproduceerd en geïnstalleerd zijn en hoe meer spelers er op de markt komen, hoe lager de prijs wordt. (California Energy Commission, 2007) Bij brandstofcellen kan de ontwikkeling van deze technologie tevens ontwikkelingen op andere gebieden stimuleren, zoals voor stationaire en draagbare toepassingen, onder andere voor laptops of gsm's, of voor warmtekrachtkoppeling. (VSB, 2007; USDOE, 2007) Ook ontwikkelingen op het vlak van waterstofproductie kunnen voordelen hebben op andere gebieden. Momenteel wordt de helft van de waterstof gebruikt bij de productie van NH₃ (ammoniak), van de rest maakt men gebruik in de petrochemische en zelfs de voedingsindustrie. Volgens het Vlaams Samenwerkingsverband Brandstofcellen (VSB) (2007) zal de vraag naar waterstof vooral in de raffinaderijen wereldwijd nog toenemen. Wanneer waterstof op een goedkopere of efficiëntere manier geproduceerd kan worden voor brandstofcellen, zullen al deze toepassingen daar ook van profiteren.
- e) Bovendien kan er gesteld worden dat de ontwikkeling van nieuwe technologieën zoals brandstofcellen positieve gevolgen hebben op sociaal economisch gebied. Er kan bijvoorbeeld meer werkgelegenheid gecreëerd worden. Hierdoor stijgt het inkomen en kan er weer meer geconsumeerd worden, wat ook andere sectoren ten goede komt.

4.8.1 Elektrische motor met batterij

Een batterij-elektrisch voertuig wordt aangedreven door een elektrische motor. De energie is afkomstig uit een oplaadbare batterij. Volgens Van Mierlo et al. (2006) is een versnellingsbak in de meeste gevallen niet nodig. De remenergie wordt deels gerecupereerd om de batterij weer op te laden. Wanneer de wagen stilstaat, verbruikt hij geen energie omdat de motor dan niet draait, wat een fundamenteel verschil is met de "gewone" auto. De elektrische motor heeft een groot acceleratievermogen.

Het aandrijfsysteem van een elektrische auto bestaat uit een interne of externe batterijlader, batterijen, een elektrische motor met elektronische regeling, transmissie en overbrenging op de wielen. (Emis, 2007)

Momenteel worden er verschillende soorten batterijen gebruikt. Loodzuur batterijen hebben een relatief lagere kost, maar hebben een lage oplaadcapaciteit per eenheid gewicht. NiCd-batterijen hebben een hogere kost, maar ook een hogere capaciteit en een langere levensduur. De meest gebruikte batterij is de NiMH-batterij. Deze heeft een hogere opslagcapaciteit en bij goed gebruik een langere levensduur dan de NiCd-batterij (Maxell, 2007). Op lange termijn wordt veel verwacht van de Li-ion-batterijen, die zeer veelbelovend lijken. (Emis, 2007) Volgens de Electricity Storage

Association (2007) hebben deze batterijen een lange levensduur, hoge energiedichtheid en een hoge efficiëntie, maar ze hebben ook een hoge kost.

Voordelen:

- Elektrische wagens stoten geen uitlaatgassen uit. De productie van de elektriciteit kan echter gepaard gaan met emissies. Deze productie moet dus op een milieuvriendelijke manier gebeuren, bijvoorbeeld door wind- of zonne-energie. (Van Mierlo et al., 2006; Emis, 2007)
- Het rendement van de elektrische motor bedraagt 80 tot 90 % tegenover slechts 10 tot 40 % voor de thermische motoren. Zelfs door het rendement van elektriciteitsproductie in rekening te brengen, blijft dit rendement hoger liggen. (Van Mierlo et al., 2006)
- Door het regeneratief remmen, waarbij de motor werkt als generator, en doordat de elektrische motor niets verbruikt als hij stilstaat, is hij 40 % meer energie-efficiënt dan benzinevoertuigen. (Van Mierlo et al., 2006)
- Meer dan 95 % van de stoffen in de batterijen kunnen gerecycleerd worden. Dit zorgt voor een lagere milieubelasting. (Van Mierlo et al., 2006)
- Elektrische wagens hebben lagere emissies van alle schadelijke stoffen behalve van PM₁₀. Die emissies kunnen zelfs iets hoger liggen dan bij het benzinevoertuig, maar wel onder die van dieselwagens. De Ecoscore is 85,7 indien uitsluitend aardgascentrales worden gebruikt voor de productie van elektriciteit. Wanneer er uitsluitend hernieuwbare energiebronnen worden gebruikt is de Ecoscore zelfs 96,7 op 100. (Van Mierlo et al., 2006) Volgens VUB, VITO en CEESE (2005) wordt de uitstoot van fijn stof bij een elektrische wagen toch ook verlaagd ten opzichte van een benzinevoertuig.
- De motor is zeer stil en soepel. (Louyet en Convié, 2006; Smart Fuel Cell, 2007)
- Het verdwijnen van heel wat lawaai bij elektrische voertuigen leidt volgens VUB, VITO en CEESE (2005) tot een rustigere rijstijl. In hetzelfde rapport wordt opgemerkt dat het in Frankrijk is opgevallen dat elektrische voertuigen minder ongevallen veroorzaken procentueel gezien dan de conventionele wagens. Het kan hier echter ook om een bias of vertekening gaan en andere factoren spelen misschien mee; zo zijn de personen die voor elektrische wagens kiezen over het algemeen misschien gewoon rustiger van aard dan de gemiddelde autobestuurder.

Nadelen:

- Elektrische voertuigen kunnen opgeladen worden via privé-stopcontacten, die al ruim aanwezig zijn in ons land, maar ook via publieke laadstations. Hiervoor moeten nog wel enkele aanpassingen of uitbreidingen aan het elektriciteitsnetwerk gebeuren. (VUB, VITO en CEESE, 2005)
- De huidige elektrische voertuigen kunnen slechts 80 tot 120 km afleggen, door de beperkte opslagcapaciteit van batterijen. (Smart Fuel Cell, 2007) Ze zijn wel zeer geschikt voor

gebruik in een stad of voor korte trajecten. Nieuwe batterijtechnologie kan deze autonomie verhogen. (Van Mierlo et al., 2006)

- De uitbatingskost van de batterij ligt hoog aangezien deze om de paar jaar moet worden vervangen. Er wordt wel verwacht dat de kostprijs zal dalen door massaproductie van de batterijen en technische ontwikkelingen. Bovendien is elektriciteit in vergelijking met diesel, benzine of LPG, veruit het goedkoopst. Wanneer er gerekend wordt met een prijs van 0,08 EUR/kWh, ligt de energiekost voor elektrische voertuigen tussen 1,6 en 1,7 EUR voor 100 km. (Van Mierlo et al., 2006)
- Het gewicht aan batterijen is relatief groot en de hoeveelheid batterijen zorgt voor ruimtebeperkingen. (Emis, 2007)
- Het motorvermogen en de maximumsnelheid – die vaak 80 tot 100 km/h bedraagt – zijn gewoonlijk lager dan bij conventionele voertuigen. (Emis, 2007)
- Elektrische voertuigen hebben een zeer hoge gemiddelde jaarlijkse kost, door de uitbaatkost van de batterij. De kost per kilometer daalt sterk naarmate er jaarlijks meer kilometers gereden worden. Volgens VUB, VITO en CEESE (2005) ligt de totale prijs per kilometer voor een elektrische wagen vanaf 15 000 km/jaar over een periode van 7 jaar, tussen de prijs van een dieselwagen en die van een benzinewagen.

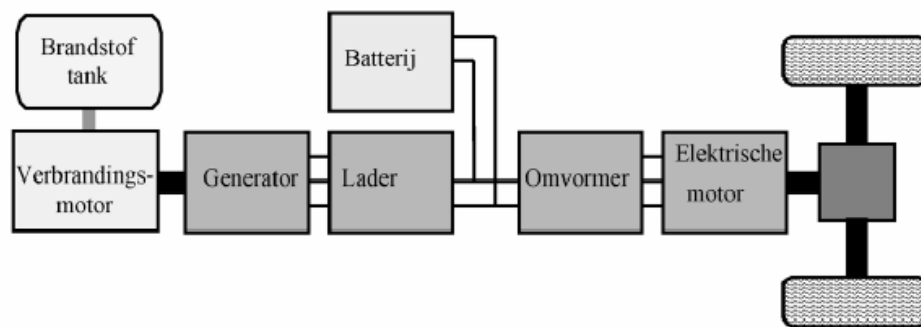
Een mogelijke reden voor het kleine marktaandeel van elektrische wagens is dat ze nooit de verkoopsdrempel haalden die nodig is om de ontwikkeling van een nieuw ontwerp te genereren. Bovendien bleek het moeilijker dan gedacht om een voertuigontwerp van het ontwerpstadium naar model over te brengen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a) Volgens JRC, IPTS en ESTO (2003b) schijnen de autoconstructeurs en de wetenschap sterk hun interesse verloren te zijn in het verder ontwikkelen van elektrische voertuigen. Dat wordt ook getoond in de film "Who killed the Electric Car?". Onderzoek spitst zich meer toe op brandstofcellen en hybride wagens, die in de volgende paragrafen besproken worden.

4.8.2 Hybride voertuigen

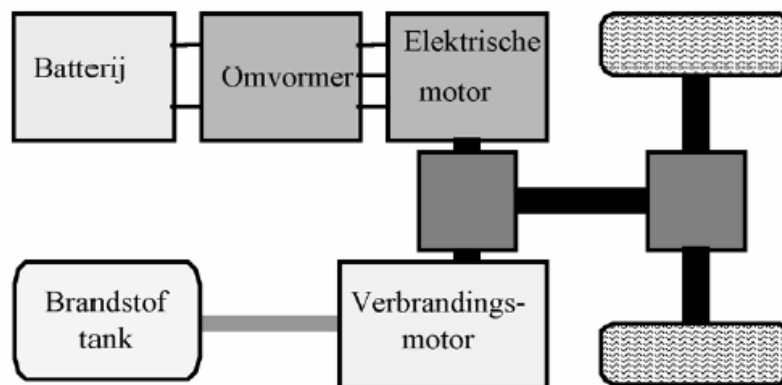
Batterij-elektrische voertuigen zijn zwaar door het gewicht van de batterijen en hebben ernstige beperkingen wat de afstand die ze kunnen afleggen betreft. Uit deze beperkingen is de ontwikkeling van hybride voertuigen geboren. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)

Hybride voertuigen maken gebruik van twee of meer aandrijfsystemen of energiebronnen. De meest voorkomende bevatten een verbrandingsmotor en een elektrische motor. De verbrandingsmotor maakt meestal gebruik van benzine, maar ook andere brandstoffen zoals diesel of LPG zijn mogelijk. Er bestaan twee grote groepen: serie-hybride en parallel-hybride. De serie-hybride voertuigen laten de batterij de piekvermogens bij het accelereren leveren en de remenergie recupereren. Het onderscheid met parallel-hybride is dat alle energie voor de

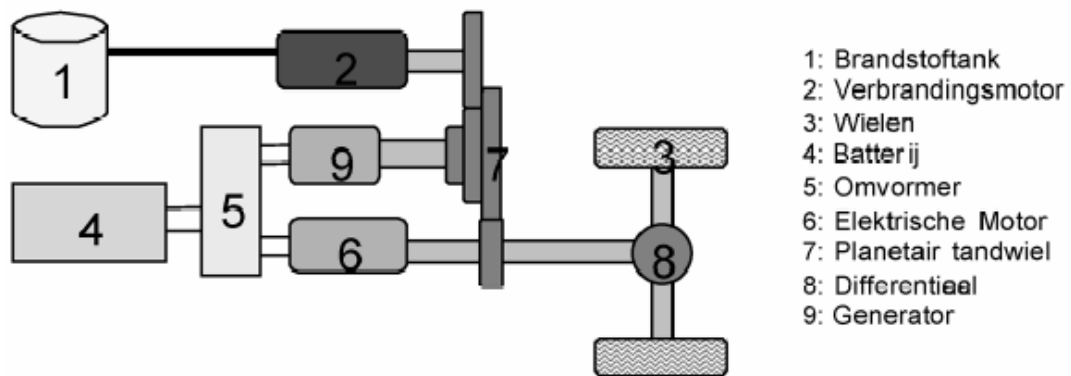
aandrijving bij serie-hybride voertuigen elektrisch beschikbaar is. De hoofdmotor is verbonden met een generator die elektriciteit produceert. Deze elektriciteit laadt de batterijen op die een elektrische motor aandrijven die de wielen beweegt. (Emis, 2007) Bij de parallel hybride voertuigen staan de batterij en het systeem dat de energie omzet in rechtstreekse verbinding met de wielen. Tijdens gewone ritten gebruikt de motor de conventionele energiebron. De batterij levert extra energie in periodes dat er veel vermogen nodig is, zoals tijdens het bergop rijden of het versnellen. (National Renewable Energy Laboratory, 2007) Door de veelvuldige omzettingen van mechanische naar elektrische energie en omgekeerd hebben serie-hybride voertuigen over het algemeen een brandstofverbruik dat maar weinig lager ligt dan bij conventionele voertuigen. Enkel in het stadsverkeer wordt er wel een voordeel behaald door de recuperatie van de remenergie. (Emis, 2007) Bij de parallel-hybride voertuigen assisteert een elektrische motor de verbrandingsmotor. De energie van de verbrandingsmotor wordt niet omgezet in elektrische energie. Hierdoor ligt het totale brandstofverbruik bij parallel-hybride systemen lager. Een gecombineerde of serie-parallel-hybride structuur bevat zowel een serie als een parallel hybride structuur. (Van Mierlo et al.,2006) In de figuren 12, 13 en 14 worden de verschillende hybride configuraties weergegeven.



Figuur 12: Serie-hybride aandrijving (Van Mierlo, 2000; geciteerd door Van Mierlo et al., 2006: 469)



Figuur 13: Parallel-hybride aandrijving (Van Mierlo, 2000; geciteerd door Van Mierlo et al., 2006: 469)



Figuur 14: Gecombineerde hybride aandrijving (Van Mierlo, 2000; geciteerd door Van Mierlo et al., 2006: 470)

De batterij kan opgeladen worden via het elektriciteitsnet, wat men dan een "plug-in hybride" noemt, of door een generatorgroep aan boord van het voertuig. (Van Mierlo et al., 2006) Het verschil tussen een hybride en elektrische wagen is dat elektrische voertuigen opslagsystemen met een hoge energiedichtheid nodig hebben en hybride voertuigen vooral nood hebben aan een hoge vermogensdichtheid. Plug-in hybrides hebben volgens het National Renewable Energy Laboratory (2007) minder emissies dan gewone hybrides. Ze hebben een grotere batterij waardoor ze voor korte afstanden vooral op elektriciteit kunnen rijden. Voor langere afstanden wordt de conventionele brandstof gebruikt. Een computer in de wagen beslist welke brandstof het meest efficiënt is.

Voordelen:

- De verbrandingsmotor kan uitgeschakeld worden wanneer er geen vermogen gevraagd wordt. Hierdoor kan het brandstofverbruik en de bijhorende emissies verminderd worden met 8 tot 15 %. Volgens Louyet en Convié (2006) liggen de broeikasgasemissies zelfs 30 tot 50 % lager bij optimaal gebruik dan bij een benzinewagen.
- Het rendement van de brandstof kan aanzienlijk verbeterd worden zonder minder goede prestaties te leveren. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)
- Het regenereren van de remenergie zorgt voor een daling tot 15 % van het energieverbruik. (Van Mierlo et al., 2006)
- Hybride wagens zorgen voor een sterke reductie van de emissies en van het brandstofverbruik. Ze verbruiken 15 % tot zelfs 50 % minder primaire energie dan conventionele voertuigen. (VUB, VITO en CEESI, 2005)
- Sommige wagens zijn in staat om zuiver elektrisch te rijden, waardoor de uitstoot zelfs tot nul gereduceerd wordt. (Van Mierlo et al., 2006; Emis, 2007)
- De grootte van de motor kan verkleind worden om de efficiëntie te verbeteren. Elektrisch

vermogen kan gebruikt worden om, wanneer nodig, de vraag naar vermogen op te vangen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)

- Koude startemissies kunnen vermeden worden. Een verbrandingsmotor stoot het meeste uit wanneer hij pas gestart is. De katalysator is dan nog niet op temperatuur. Door in het begin van de rit elektrisch te rijden, kunnen deze emissies vermeden worden. (Emis, 2007)
- De batterij moet nooit worden opgeladen via een stopcontact zoals bij elektrische wagens. (Aminal, 2007)

Deze voertuigen nemen de belangrijkste nadelen van puur elektrische voertuigen weg, namelijk lange oplaadtijd en korte afstand die ze kunnen afleggen met de energie aan boord. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a)

Nadelen:

- De hybride technologie doet de complexiteit en de kost van de voertuigen wel toenemen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)
- De kost van de voertuigen neemt eveneens toe. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)
- Ook verhoogt het gewicht van het voertuig door de bijkomende onderdelen. Hierdoor is er meer brandstof vereist, wat de energievoordelen wat doet afnemen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Maar aangezien de efficiëntie verbeterd wordt en er geen extra kost is om de brandstof te produceren, is dit toch een kosteneffectieve oplossing voor CO₂-vermindering. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004; CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006)

De rij-ervaring kan wel wijzigen doordat er meer gebruik gemaakt wordt van automatische transmissie in hybride voertuigen. (IEEP, 2005) Of dit een voordeel of een nadeel is, wordt in het midden gelaten.

De verkoop van hybride wagens neemt sterk toe. Alle grote autoconstructeurs hebben één of andere vorm van een hybride programma. (Fuel Cell Today, 2006b)

4.8.3 Brandstofcellen

Brandstofcellen zorgen voor een chemische omzetting van waterstof en omgevingslucht om DC of gelijkstroom, warmte en water te produceren. Globaal gezien gebeurt de volgende chemische reactie: $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O + \text{elektriciteit} + \text{warmte}$. Hiermee voeren ze eigenlijk het omgekeerde proces uit als hetgeen dat bij elektrolyse plaatsvindt. In theorie zou dus dezelfde hoeveelheid energie moeten vrijkomen. In de praktijk treden er kleine verliezen op. (fuelcellpark.com, 2007) De aantrekkelijkste eigenschap is hun hoge efficiëntie, vergeleken met thermische motoren. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Dergelijke voertuigen zullen waarschijnlijk pas over tien à twintig jaar gecommmercialiseerd worden. Het energieverbruik ligt, door het hogere rendement van

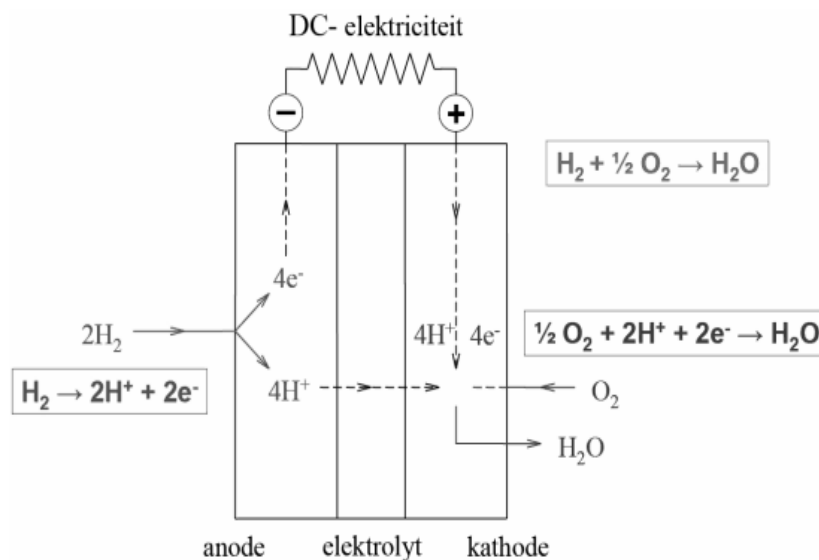
de brandstofcel in combinatie met een elektrische aandrijving, lager dan bij conventionele voertuigen.

Het onderscheid met een batterij bestaat hierin, dat een batterij energie opslaat. Wanneer de batterij leeg is, moet de batterij herladen worden, of weggegooid. Een brandstofcel daarentegen levert energie en zal dit blijven doen zolang ze brandstof krijgt toegediend van buitenaf. (Ballard, 2007)

4.8.3.1 Werking

Een brandstofcel bestaat uit twee elektrodes, de kathode of de positieve elektrode, en de anode, die negatief geladen is. Beide elektrodes worden gescheiden door een elektrolyt. Ze zijn bedekt met een katalysator. Deze katalysator is meestal een edel metaal zoals platina. (USDOE, 2007)

Waterstof wordt naar de anode geleid, waar waterstof gesplitst wordt in protonen en elektronen volgens de reactie: $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$. De waterstofionen dringen door het elektrolyt. De elektronen kunnen dit echter niet en worden weggeleid naar een extern circuit waar ze bruikbare elektriciteit creëren. Ze verplaatsen zich naar de positief geladen kathode. Zuurstofmoleculen uit de lucht worden naar de kathode gestuurd, waar ze gereduceerd worden tot zuurstofionen door opname van de elektronen die terugkeren uit het externe circuit en vervolgens binden met de waterstofprotonen die door het membraan gedrongen zijn. Zo worden water en warmte gevormd. De volgende reactie grijpt plaats: $\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$. (VSB, 2007; fuelcellpark.com, 2007) Het hele proces wordt in de onderstaande figuur 15 getoond.



Figuur 15: Werking van de brandstofcel (VSB, 2007)

De werking van de brandstofcel verloopt iets anders bij de verschillende types. In paragraaf 4.8.3.4 worden de verschillende soorten brandstofcellen kort besproken. Bij PEM en PAFC brandstofcellen, dringen de protonen (H^+) door het membraan heen naar de kathode, zoals hierboven beschreven werd. Bij AFC, Molten Carbonate en de Solid Oxide brandstofcellen, gaan de negatieve ionen (OH^-) door het elektrolyt naar de anode, waar ze met waterstof combineren om water en elektronen te vormen. (USDOE, 2007)

Het vermogen dat door een brandstofcel kan opgewekt worden is afhankelijk van verschillende factoren. Het type brandstofcel, de grootte, de werkingstemperatuur en de druk waarop de gassen worden toegediend zijn allemaal elementen die het geproduceerde vermogen beïnvloeden. (USDOE, 2007) Omdat elke brandstofcel slechts een kleine spanning kan opwekken, minder dan 1 V, worden verschillende brandstofcellen samengeplaatst in een fuelcellstack om tot bruikbare spanningen te komen. (Werner, 2000) Omdat het aantal brandstofcellen in een stack zo gemakkelijk kan gevarieerd worden, is een brandstofcel bruikbaar voor een hele waaier verschillende toepassingen. Zowel in laptops – die werken bij 50 – 100 W – als in voertuigen – die een vermogen van 50 – 125 kW nodig hebben – als in krachtcentrales – die van 1 tot 200 MW of zelfs nog meer werken – kan men een brandstofcel gebruiken. (USDOE, 2007) Met de term brandstofcel wordt vaak verwezen naar de brandstofcelstack, hoewel dit strikt genomen niet hetzelfde is.

4.8.3.2 Reformer

Waterstof kan rechtstreeks gebruikt worden in het brandstofcelsysteem, of kan aan boord gevormd worden uit andere brandstoffen. Het rechtstreekse gebruik van waterstof heeft als nadelen dat de opslag aan boord van het voertuig nog voor problemen zorgt – dit is al besproken in de paragraaf 4.4 Waterstof – en het ontbreken van een infrastructuur. Het tanken van waterstof heeft zijn bruikbaarheid en veiligheid al bewezen. Het publiek moet nog wel overtuigd worden van de veiligheid van waterstof. Andere brandstoffen zijn makkelijker hanteerbaar maar dan is er een reformer aan boord nodig wat het systeem ingewikkelder maakt. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b; Emis, 2007) Bovendien neemt het gewicht van de wagen in dat laatste geval toe en is de daling van de broeikasgassen die wordt bewerkstelligd door het gebruik van waterstof via reformers aan boord vrij beperkt door het gebruik van conventionele brandstoffen. Het is een uitdaging een reformer te bouwen die klein en efficiënt is. Bovendien is er een controlesysteem nodig voor de reformer, de brandstofcel en de interface tussen de twee. Productie aan boord van het voertuig is meer energie-intensief dan stationaire productie van waterstof. Een stationaire reformer kan efficiënter – met ongeveer 90 % efficiëntie – gebeuren in steady-state omstandigheden, terwijl een eenheid aan boord onder wisselende omstandigheden werkt en een efficiëntie van 80 tot 85 %

haalt. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) Een bijkomend nadeel van een reformer aan boord is dat het systeem gevoeliger wordt voor storingen. (Pecqueur, 2007b)

Een reformer werkt als volgt: de waterstofhoudende brandstof wordt samen met een hoeveelheid lucht opgewarmd tot een hoge temperatuur, waarbij een synthesegas van waterstof en koolstof gevormd wordt. Bij dit synthesegas wordt stoom toegevoegd waardoor er extra waterstof geproduceerd wordt, doordat dit water gaat splitsen. De vrijgekomen zuurstofatomen van dit bijgevoegde water gaan combineren met de CO (koolstofmonoxide) en vormen CO₂. Deze CO₂ wordt vrijgelaten in de atmosfeer. Als er nog CO overblijft, moet die verwijderd worden, want CO kan de werking van de katalysator aantasten. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) In een reformer kan de techniek van stoomreformatie worden toegepast, die onder de paragraaf 4.4.1 Productie werd besproken. Tevens kan er partiële oxidatie worden gebruikt, wat analoog verloopt als stoomreformatie, maar er wordt aanvankelijk met een ondermaat aan zuurstof gewerkt. Later wordt er nog zuurstof bijgevoegd. Deze reactie is exotherm in plaats van endotherm en verloopt typisch veel sneller dan stoomreformatie. (USDOE, 2007) Omdat de reactie exotherm is, gaat er een hoeveelheid waterstof verloren onder de vorm van warmte. De efficiëntie van het proces is ongeveer 50 %. Een voordeel van de exotherme reactie is dat het proces minder reageert op veranderende belastingen, wat van pas komt aan boord van een voertuig. In dit proces kunnen zwaardere koolwaterstoffen gebruikt worden dan bij stoomreformatie, maar dat is duurder. De grondstof is wel goedkoper, maar de inkomende zuurstof uit de lucht moet gezuiverd worden en de zwaardere brandstoffen bevatten onzuiverheden, waardoor het uiteindelijke proces duurder wordt dan stoomreformatie. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)

De reactie die bij partiële oxidatie plaatsvindt is de volgende: (USDOE, 2007)

Voor methaan: $CH_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + 2 H_2 (+ \text{warmte})$

Voor propaan: $C_3H_8 + 1 \frac{1}{2} O_2 \rightarrow 3 CO + 4 H_2 (+ \text{warmte})$

De gevormde CO reageert verder volgens de volgende reactie: (USDOE, 2007)

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 (+ \text{een beetje warmte})$

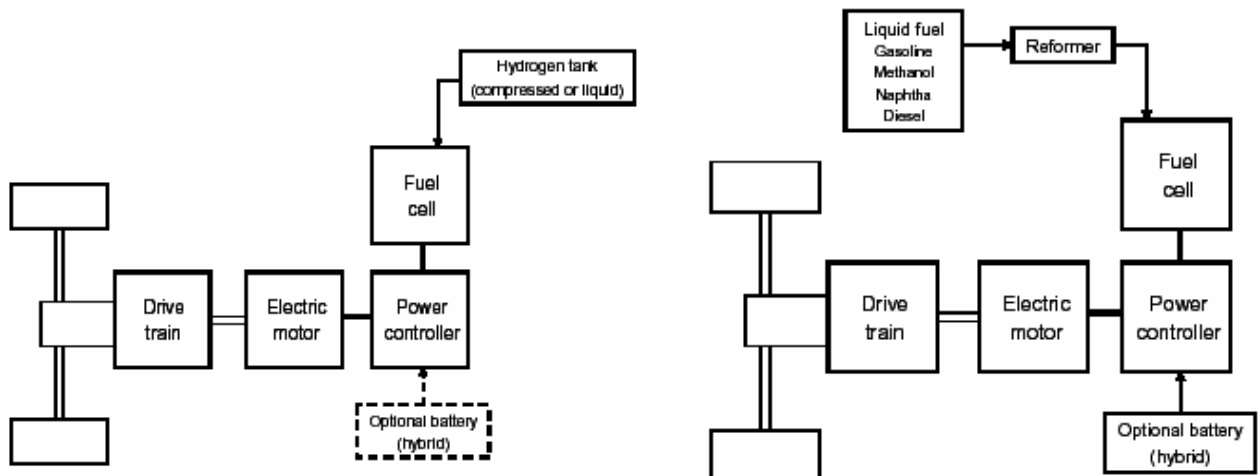
Wanneer er een reformer gebruikt wordt, zijn er verschillende brandstoffen mogelijk om te gebruiken, zoals benzine, aardgas, methanol³⁸ of ethanol. Maar geen van deze brandstoffen zal een echte oplossing op lange termijn zijn volgens het rapport van JRC, IPTS en ESTO (2003b) door infrastructuurproblemen of problemen door onzuiverheden in de brandstof. Onzuiverheden kunnen met de katalysator binden en de levensduur en de efficiëntie van de brandstofcel aantasten. Afhankelijk van de gebruikte brandstof kan de huidige infrastructuur gebruikt worden, of moet een nieuwe ontwikkeld worden. In het rapport van CONCAWE, EUCAR en JRC (2006) wordt een

³⁸ Tegen het gebruik van methanol is wat tegenkanting gericht omdat het een giftige stof is. Wanneer het op de huid terecht komt kan het huidproblemen veroorzaken. Wanneer het terechtkomt in het grondwater, kan het voor vervuiling zorgen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)

voertuig waarbij benzine omgevormd wordt tot waterstof in een reformer genoemd als een mogelijke overgangstechnologie om de brandstofcelmarkt te helpen groeien. Voor de consument is hiervoor geen enkele aanpassing nodig, maar benzine is moeilijk om om te zetten en bevat veel onzuiverheden. De meeste wetenschappers zijn het erover eens dat het geen zin heeft om aardgas aan boord om te zetten in waterstof. Als er dan toch gas wordt opgeslagen aan boord van het voertuig, kan dat beter waterstof zijn dan aardgas. Voor de productie van waterstof off-board is aardgas wel een goede korte termijn oplossing zoals al in de paragraaf 4.4 Waterstof werd aangehaald. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Ook General Motors (2007) noemt de reformatie van brandstoffen die nu gebruikt worden, zoals benzine en aardgas, een goede overgangstechnologie. Zo wordt er tijd gewonnen om een waterstofinfrastructuur – die volgens General Motors het ultieme antwoord is op de energieproblematiek – uit te bouwen en kan de consument wennen aan het idee om waterstof te gebruiken in zijn wagen, terwijl er aanvankelijk nog niet veel wijzigt omdat de mensen gewoon een brandstof kunnen tanken waaraan ze gewoon zijn. Linde Gas (2007) ziet de reformer ook als een goede oplossing voor de tussentijd, maar het bedrijf denkt dat elektrolyse de oplossing op lange termijn zal zijn. Op die manier kan men hernieuwbare bronnen gebruiken om te komen tot een echte op waterstof gebaseerde samenleving.

Critici daarentegen vinden de reformer een dure en onnodige, lange termijn strategie die onnodig veel gaat kosten. Op lange termijn moet er volgens hen toch gestreefd worden naar brandstofcellen op pure waterstof. Wanneer men een reformer gebruikt, wordt er nog steeds CO₂ uitgestoten. Bovendien blijft men onnodig afhankelijk van olie. (Rifkin, 2002)

In onderstaande figuur wordt een schematische voorstelling van een brandstofcelvoertuig met (rechtse figuur) en zonder reformer (linkse afbeelding) weergegeven.



Figuur 16: Direct en indirect gebruik van waterstof in een brandstofcelvoertuig (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006: 45 en 47)

4.8.3.3 Voor- en nadelen

Voordelen:

Waterstof heeft, indien het in een brandstofcel wordt gebruikt, een lager Tank-to-Wheels-energieverbruik dan een verbrandingsmotor, maar de Well-to-Tank-energie die nodig is om de waterstof te produceren ligt wel hoger. Wanneer waterstofgas wordt gebruikt als energiedrager voor de brandstofcel van een voertuig, moet het aantal centrales voor het opwekken van energie verdrievoudigen tegenover de situatie waarbij de opgewekte elektriciteit rechtstreeks zou gebruikt worden. (Van Mierlo et al., 2006) Met andere woorden wordt de hoge efficiëntie van het gebruik van brandstofcellen tenietgedaan door de lage efficiëntie van de productie en de distributie van waterstof. (Thijssen, 2005)

Een brandstofcelvoertuig produceert in principe enkel stroom, warmte en water. In principe zijn het Zero Emission Vehicles (ZEV), voertuigen zonder emissies van schadelijke stoffen. In de praktijk worden er ook kleine hoeveelheden van andere componenten uitgestoten. Wanneer er gebruik gemaakt wordt van een reformer, wordt er ook CO₂ geëmitteerd, net zoals verdampingsemissies en kleine hoeveelheden emissies van de reformer. (Emis, 2007)

Het eerste voordeel van een brandstofcel is de hoge efficiëntie³⁹, voor het volledige brandstofcelsysteem bedraagt het rendement 30%⁴⁰ (de efficiëntie van een benzinewagen bedraagt ter vergelijking slechts ongeveer 15 % volgens het rapport van JRC, IPTS en ESTO, 2003a). Ook de lage emissies en de lage geluidsproductie zijn belangrijke voordelen. (Werner, 2000; USFCC, 2005b; Emis, 2007) Eén van de belangrijkste voordelen van de brandstofcel is dat de efficiëntie van de brandstofcel onafhankelijk is van de belasting. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Brandstofcellen zouden ook minder onderhoud vereisen dan conventionele verbrandingsmotoren omdat ze geen bewegende delen hebben. Bovendien zijn brandstofcellen zeer flexibel en kan een brandstofcel aangepast worden om aan de exacte vraag naar energie te voldoen, door meer of minder brandstofcellen in een stack op te nemen. Doordat ze de afhankelijkheid van het elektriciteitsnet kunnen verminderen en ingezet kunnen worden op de plaats zelf waar elektriciteit nodig is, bieden brandstofcellen mogelijkheden om gebruikt te worden in ontwikkelingslanden voor stationaire toepassingen. (Werner, 2000) Dit kan de armoedekloof dichten tussen de ontwikkelingslanden en de ontwikkelde landen. De belangrijkste oorzaak van het ontstaan van deze armoedekloof ligt bij het huidige op olie gebaseerde energiesysteem. Dit systeem maakt een onderscheid tussen degenen die over olie beschikken en degenen die dit niet doen. Het gebruik van deze olie heeft de globalisering en de stijgende welvaart mogelijk gemaakt – voor sommigen

³⁹ Deze hoge efficiëntie wordt verklaard door het feit dat chemische energie rechtstreeks wordt omgezet in elektriciteit. Dit in tegenstelling tot bij conventionele brandstoffen waar er nog een extra tussenstap gebeurt waarbij de verbranding van de brandstof plaatsvindt. (Werner, 2000)

⁴⁰ Er gaat op verschillende plaatsen energie verloren, zoals bij de productie, distributie en opslag van de brandstof, maar ook bij de eventuele reforming aan boord. Bovendien is de efficiëntie van de brandstofcel zelf geen 100%, dus gaat ook daar energie verloren. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)

althans. Vermits waterstof overal beschikbaar is, zou iedereen "machtig" kunnen worden, in plaats van enkel de grote olieconcerns. (Rifkin, 2002)

De efficiëntie van brandstofcelvoertuigen ligt hoger dan die van voertuigen waar waterstof verbrand wordt via een vonkontstekingsmotor. Hierdoor hebben brandstofcelvoertuigen een kleinere en lichtere tank. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004)

Grote brandstofcellen hebben het bijkomende voordeel dat ze proper drinkwater produceren als bijproduct. (Rifkin, 2002) Ook in onze contreien kan de belasting op het elektriciteitsnet verminderd worden. De behoefte aan ondergrondse elektriciteitsleidingen wordt verminderd. Deze zijn duur om te installeren en te onderhouden en gaan gepaard met verlies van energie. Door de installatie van brandstofcellen waar de elektriciteit nodig is, worden grote centrale krachtcentrales overbodig. Hierdoor valt ook hun impact op het milieu weg. (Ballard, 2007) Ook kunnen ze dienen als back-up energievoorziening wanneer het elektriciteitsnet uitvalt. Brandstofcellen hebben het potentieel om de energieafhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen. (USFCC, 2005b)

De brandstofcel maakt decentrale energieopwekking mogelijk. De eindgebruiker is consument, maar wordt tegelijkertijd ook producent. Wanneer de verschillende decentrale brandstofcellen verbonden worden tot een reusachtig net, komen koper en verkoper op gelijke voet te staan. De reusachtige energiebedrijven die nu bestaan raken hun macht kwijt. Maar of waterstof echt de energie van het volk wordt, is afhankelijk van de reactie van overheden en openbare nutsbedrijven. Zij moeten geld willen besteden aan de ontwikkeling van een dergelijk netwerk. Met nieuwe internettechnologieën en geavanceerde software kunnen de brandstofcellen met elkaar verbonden worden. Eindgebruikers kunnen zo hun elektriciteit produceren én ze delen met anderen. (Rifkin, 2002)

Een brandstofcel is altijd bruikbaar. (Smart Fuel Cell, 2007) Men is niet afhankelijk van zonlicht of wind bijvoorbeeld. In tegenstelling tot batterijen, moeten brandstofcellen niet vervangen worden of geen lange herlaadcyclus ondergaan. Bovendien wordt de afstand die een brandstofcelvoertuig kan afleggen enkel beperkt door de capaciteit van de tank, niet door de brandstofcel zelf. (Ballard, 2007) Brandstofcellen vergroten de ontwerpvrijheid van de autoconstructeurs. De vormgeving van de brandstofcel wordt niet opgegeven door de aanwezigheid van een krukas, drijfstangen en cilinders met zuigers. (ECN, 2007)

Volgens Rifkin (2002) zouden auto's op brandstofcellen gedurende de uren dat ze niet gebruikt worden, kunnen ingeplugd worden op het elektriciteitsnet om zo elektriciteit terug te leveren aan het net. Vermits de gemiddelde wagen 96 % van de tijd niet gebruikt wordt, kan het zo een profit center worden in plaats van gewoon een voorwerp dat alleen maar plaats inneemt. Omdat elektriciteit geproduceerd kan worden door elke eigenaar van een wagen, kan de elektriciteit

voorzien worden om net aan de noden van de gebruiker te voldoen. Dit is veel efficiënter en een goedkopere manier om elektriciteit te leveren aan de eindgebruiker. Deze methode bespaart zelfs tussen de 5 % en 8 % energie omdat dat de hoeveelheid energie is die verloren gaat door de distributie langs elektriciteitsleidingen over grote afstanden. Ook Hydrogen and Fuel Cells Canada (2007) en FuelCells2000 (2007) vermelden dat brandstofcelwagens kunnen gebruikt worden om elektrische toestellen van stroom te voorzien wanneer de wagen niet gebruikt wordt.

Nadelen:

De lage emissies moeten wel genuanceerd worden. De milieu-impact van het gebruik van waterstof wordt volledig bepaald door het proces dat gebruikt wordt voor de productie voor waterstof. Enkel wanneer de energie afkomstig is van hernieuwbare bronnen, vindt er een daling van de emissies plaats en kan er werkelijk een nuluitstoot bereikt worden.

Een nadeel is dat een brandstofcel niet kan gestart worden bij vriesweer. Verschillende autoconstructeurs vermelden echter dat ze dit euvel verholpen hebben en dat hun voertuigen ook bij vriestemperaturen kunnen gestart worden. Bovendien heeft een brandstofcel een hoog gewicht en lopen de kosten hoog op, zoals hierboven reeds vermeld werd. (Emis, 2007) Dit zijn de grootste obstakels die de commercialisering van brandstofcellen in de weg staan. De hoge kost is ten eerste te wijten aan de dure materialen die gebruikt worden om de brandstofcellen te construeren. Als katalysator⁴¹ gebruiken brandstofcellen edele metalen, vooral platina. Daarenboven zijn de membranen zeer duur. Daarbij komt nog dat ze slechts in beperkte hoeveelheden geproduceerd worden en er dus geen schaalvoordelen kunnen optreden die nodig zijn om de prijs te laten zakken. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Momenteel ligt de productiekost nog zeer hoog, namelijk 3 000 EUR/kW tot 8 000 EUR/kW. Voorspeld wordt dat bij overgang naar massaproductie en naar goedkopere materialen de prijs kan dalen tot ongeveer 200 EUR/kW. (Zwegers, 2005, geciteerd door Van Mierlo et al., 2006; Fuelcells2000, 2007) Elektriciteit opgewekt in een gasgestookte elektriciteitscentrale kost ter vergelijking 500 tot 1 000 USD/kW, wat ongeveer overeenkomt met 368 tot 736 EUR/kW. Om een middelgrote auto aan te drijven, zou de brandstofcel toch 60 tot 90 kW moeten leveren. (JRC, IPTS en ESTO 2003b) Daarbij komt nog de kost van de waterstof, die afhankelijk is van de grondstof waaruit waterstof wordt geproduceerd, de productietechnologie, de opslagmethode en de distributie. De huidige investeringskost voor elektrolyse bedraagt 4 000 EUR/kW, maar de doelstelling is om dit te verlagen tot 300 EUR/kW over 5 jaar tot 10 jaar. Het comprimeren van waterstof tot een druk van 700 bar kost 2,5 EUR/GJ. Van Mierlo et al. (2006) schrijven dat de prijs van een verbrandingsmotor ter vergelijking 50 EUR/kW bedraagt. Deze prijs zouden brandstofcellen moeten bereiken om competitief te zijn. Om de kost van een

⁴¹ Quantum Sphere (2007) heeft nano-katalysatoren ontwikkeld met een hoge kwaliteit. Deze kunnen geproduceerd worden tegen commerciële prijzen. Het bedrijf gebruikt Nano Nikkel als katalysator in het elektrolyse proces. Ook in de elektrodes van verschillende brandstofcellen kan Nano Nikkel gebruikt worden als katalysator, in plaats van het dure platina. Nano Nikkel is ongeveer 80 % goedkoper. Bovendien is het nanometaal zeer efficiënt en heeft het een lange levensduur, waardoor de efficiëntie van de brandstofcel verhoogd kan worden. (Quantum Sphere, 2007)

brandstofcelsysteem te verminderen, moeten de kosten van de onderdelen dalen. Zo zijn onderzoekers er in geslaagd om de hoeveelheid katalysator uit edele metalen met 90% te verminderen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Momenteel gebruikt men ongeveer 1,1 g/kW platina voor beide elektrodes. (USDOE, 2007) Fuelcells2000 (2007) vermeldt dat door de vermindering van de benodigde hoeveelheid platina katalysator tot een doel van 0,2g/kWh en een verdere reductie in de membraankost, op lange termijn een daling van de kost tot ongeveer 30 USD/kW tot 50 USD/kW mogelijk kan zijn. Dit komt neer op 22 tot 37 EUR/kW. Dan zouden brandstofcelvoertuigen zoals gezegd competitief zijn. Ook Ballard (2007) stelt dat tegen 2010 de kost 30 USD/kW zou kunnen zijn. Het bedrijf haalde in 2005 reeds een kostenreductie tot 57 USD/kW of ongeveer 43 EUR/kW. General Motors (2007) verwacht dat de 30 EUR/kW tegen 2010 – 2015 zal gehaald worden. Het bedrijf vergelijkt de kostenreductie waarmee brandstofcellen geconfronteerd worden met deze die de computerchips hebben moeten realiseren. De computerindustrie realiseerde een kostenreductie van ongeveer 3 000 % in 13 jaar tijd; van 17 000 USD in 1988 tot 6 USD in 2001. Uiteindelijk zal waterstof even goedkoop zijn als computers en mobiele telefoons. Wanneer dat gebeurt, wordt het mogelijk energie te democratiseren en beschikbaar te stellen voor ieder mens op aarde. (Rifkin, 2002)

Volgens Carlson et al. (2005) was het in 2005 mogelijk een stack te vervaardigen voor 67 USD/kW (ongeveer 50 EUR/kW). Dat de prijs zo hoog ligt, valt te verklaren doordat de platinaprijs in 2005 900 USD/troz⁴² bedroeg, wat het dubbel is van de historische platinaprijs die daarvoor al jaren aanhield. In deze kost van 67 USD/kW is de kost van de balance of plant niet begrepen. Balance of plant wordt in paragraaf 4.8.3.5 besproken. In 2005 was de totale geschatte kost voor een volledig systeem van 80 kW voor transporttoepassingen 108 USD/kW wanneer er 500 000 systemen/jaar geproduceerd zouden worden, maar met de technologie van vandaag, en wanneer er rekening gehouden wordt met een platinakost van 900 USD/troz. Wanneer er gerekend wordt met de historische platinaprijs van 450 USD/troz, komt de kost voor het volledige systeem op 88 USD/kW, wat ongeveer 66 EUR/kW is.

De kost om waterstof te tanken zou volgens General Motors (2007), om competitief te zijn met benzine, in Europa ongeveer 8 USD/kg of dus ongeveer 6 EUR/kg moeten bedragen. Hieraan kan in Europa al voldaan worden.

De verwarmingstijd van de brandstofcel kan verminderd worden door een extra batterij te gebruiken. Zo kan een hybride brandstofcelvoertuig ook gebruik maken van recuperatie van de remenergie. Het nadeel van deze hybridisatie is natuurlijk extra gewicht en bijkomende kost. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Een ander voordeel is dat de brandstofcel door het gebruik van de regeneratieve remenergie kan werken bij ongeveer constante belasting. Hierdoor wordt de efficiëntie gemaximaliseerd. (JRC, IPTS en EST, 2003b) DaimlerChrysler heeft de F600 Hy^{Genius}

⁴² 1 troz komt overeen met 31,1035 g. (Prakken Edelmetaal, 2007)

ontwikkeld, die het equivalent van 2,9 l/100 km diesel verbruikt en 400 km zelfstandig kan afleggen. De koude startmogelijkheden zijn sterk verbeterd, hij kan starten vanaf -25 °C. (DaimlerChrysler, 2007) Het is een hybride voertuig dat zelfstandig beslist welke aandrijfvorm het efficiëntst is: de batterij of de brandstofcel. (Fuel Cell Today, 2006b) De meeste autoconstructeurs bouwen hybride brandstofcelvoertuigen, die zowel uitgerust zijn met een brandstofcel als met een batterij. Een overzicht van de recentste ontwikkelingen bij de belangrijkste autoproducenten op het vlak van brandstofcelvoertuigen wordt gegeven in paragraaf 4.8.3.6 Overzicht van de activiteiten van de belangrijkste autoconstructeurs.

Een bijkomend nadeel is dat het veel efficiënter is om elektriciteit rechtstreeks te gebruiken in een voertuig, dan deze te gebruiken om waterstof te produceren en het voertuig vervolgens met de waterstof aan te drijven. Eaves en Eaves (2007) vergelijken de kost van een elektrisch voertuig met die van een brandstofcelvoertuig op waterstof. De samenvatting van de vergelijking is opgenomen in tabel 9. Bij een elektrisch voertuig wordt, in het geval er uitgegaan wordt van het gebruik van hernieuwbare bronnen, de windenergie of een ander alternatief omgezet in elektrische energie, die op zijn beurt wordt omgezet in mechanische energie in de wagen. Er zijn dus twee omzettingsstadia nodig.

Wanneer een brandstofcelvoertuig gebruikt wordt, wordt de energie van de hernieuwbare bron omgezet in elektriciteit, die wordt gebruikt voor de elektrolyse om waterstof te produceren. De waterstof wordt vervolgens vervoerd via bijvoorbeeld pijpleidingen om aan boord van het voertuig te worden opgeslagen en wordt terug omgezet in elektrische energie om de wagen aan te drijven. Wanneer er volgens het rapport van Eaves en Eaves (2007) rekening gehouden wordt met een efficiëntie van het elektriciteitsnet van 92 %, een batterij-oplader die 89 % efficiënt is, de batterij zelf die ongeveer met 94 % efficiëntie werkt en de elektrische aandrijving die maar 89 % van de geleverde energie omzet in mechanische energie, wordt er bij het elektrische voertuig een totale efficiëntie van 77 % bekomen in de studie van Eaves en Eaves (2007). Er is dus ongeveer 79 kWh nodig om 60 kWh te leveren om het voertuig aan te drijven.

Om diezelfde 60 kWh te leveren in een brandstofcelvoertuig is er 202 kWh geleverde windenergie – of van een andere niet-fossiele bron – nodig. Voor deze berekening werken Eaves en Eaves (2007) met een elektrolyse-efficiëntie van 72 %, een efficiëntie voor de compressie, expansie en distributie via pijpleidingen van 86 % en een efficiëntie van 54% voor de brandstofcel en de waterstofopslag aan boord van het voertuig. Voor de elektrische aandrijving nemen de auteurs dezelfde 89 % aan als in de berekening van het elektrisch voertuig. De totale efficiëntie komt in dit geval neer op 30 %. Dit is ongeveer 2,6 maal minder efficiënt dan voor het batterij-elektrisch voertuig. Deze berekening toont aan dat een brandstofcelvoertuig, wanneer de verschillende tussenstappen ook in acht worden genomen, toch niet zo efficiënt is. Tabel 9 vat de berekeningen samen. Aan deze hele route kunnen misschien wel nog efficiëntieverbeteringen worden

aangebracht. Ook Machetto (2006) zegt dat het rechtstreekse gebruik van de elektriciteit een veel hoger rendement heeft dan de elektriciteit te gebruiken voor de productie van de waterstof, wat een lange, dure omweg is. Hij stelt dat het rechtstreekse gebruik van elektriciteit 4 keer efficiënter is. Bossel, Eliasson en Taylor (2005) vermelden eveneens dat het elektriciteitstransport via elektronen veel efficiënter is dan energiedistributie via waterstof. Deze auteurs komen ook tot een algemene efficiëntie van bron tot output van 30 % voor een brandstofcel, door de energieverliezen die optreden in elke stap. Daartegenover staat een efficiëntie van misschien zelfs 90 % voor het rechtstreeks gebruik van elektriciteit volgens de auteurs. Ze denken niet dat er een waterstofeconomie zal komen. Brandstofcellen kunnen volgens hen wel gebruikt worden voor specifieke applicaties.

Tabel 9: Het batterij-elektrische voertuig tegenover het brandstofcelvoertuig

Efficiënties	Batterij-elektrisch	Brandstofcel
Elektriciteitsnet	92 %	
Batterij-oplader	89 %	
Batterij	94 %	
Elektrische aandrijving	89 %	89 %
Elektrolyse		72 %
Pijpleidingen		86 %
Brandstofcel + opslag aan boord		54 %
Totale Efficiëntie	77 %	30 %
Input energie nodig om 60 kWh te leveren	79 kWh	202 kWh

Bron: op basis van Eaves en Eaves (2007)

4.8.3.4 Soorten brandstofcellen

Er zijn verschillende soorten brandstofcellen die onderscheiden worden naargelang het soort elektrolyt dat ze gebruiken. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b; Oy Hydrocell, 2007) Het elektrolyt bepaalt de eigenschappen van de brandstofcel zoals de werkingstemperatuur en het vermogen (Barendrecht, Barten en de Vaal, 1994). Werkingstemperatuur is een kritische eigenschap voor brandstofcellen door de snelle start en thermische isolatieproblemen. Op basis hiervan kunnen brandstofcellen in twee grote categorieën verdeeld worden.

Lage temperatuur brandstofcellen

Brandstofcellen die beschikken over een lage werkingstemperatuur, hebben snelle opstarttijden, een compact volume en lager gewicht dan hoge temperatuur-brandstofcellen. Hierdoor zijn ze populair in transporttoepassingen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Er zijn drie hoofdtypes bij deze brandstofcellen; de PEM, PAFC en alkaline brandstofcellen.

- PEM (Proton Exchange Membrane)

Dit is het brandstofceltype dat het meest gebruikt wordt in voertuigtoepassingen. (Fuel Cell Today, 2006a) Dit komt omdat ze een lage werkingstemperatuur hebben. (FuelCells2000) De afkorting PEM staat voor Proton Exchange Membrane of Polymer Electrolyt Membrane, wat meteen duidelijk maakt dat deze brandstofcel gebruik maakt van een vast polymeer ionengeleidend membraan. (VSB, 2007) De werkingstemperatuur is rond 70 à 80 °C gelegen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Door de lagere temperatuur slijten de PEM-brandstofcellen minder snel. (USDOE, 2007)

De voordelen van de PEM-brandstofcel zijn allereerst een hoge vermogensdichtheid en snelle opstarttijd. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Het geproduceerde vermogen van de PEM kan gemakkelijk gevarieerd worden. Dit maakt deze brandstofcel zeer geschikt voor toepassingen in de transportsector, omdat daar aan wisselende belastingen moet kunnen worden voldaan. (fuelcellpark.com, 2007) Bovendien is de PEM zeer stil, zoals alle brandstofcellen. (California energy Department, 2007) De efficiëntie schommelt tussen 35 % en 45 %. (VSB, 2007) Ze zijn ook kleiner en lichter dan de andere brandstofcellen wat hen uiterst geschikt maakt voor applicaties in de transportsector.

De PEM-brandstofcel heeft een platina katalysator nodig om de protonen en elektronen te scheiden, wat de kost significant doet stijgen. Deze katalysator is zeer vatbaar voor de aanwezigheid van koolstofmonoxide. (USDOE, 2007) CO kan de levensduur sterk verlagen en de efficiëntie aantasten. De kathode kan gewoon gevoed worden met omgevingslucht. (VSB, 2007) Een ander nadeel is de lagere efficiëntie ten opzichte van andere brandstofcellen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)

De wereldleider in de PEM-brandstofceltechnologie is Ballard. Het bedrijf zegt dat klanten van hen veiligheid, betrouwbaarheid, een lage kost en de mogelijkheid om grote volumes te produceren verwachten. (Ballard, 2007)

Een speciaal type PEM-brandstofcel is de Direct Methanol FuelCell (DMFC) die methanol gebruikt als brandstof in plaats van waterstof en omgevingslucht in plaats van zuurstof. Dit kan een minder dure brandstofceltechnologie zijn, doordat er geen dure reformer nodig is. Ook de problemen in verband met de opslag van waterstof aan boord zijn dan opgelost. Een nadeel is dat de DMFC een lagere efficiëntie heeft dan de PEM. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Methanol is giftig en wateroplosbaar. Dat zorgt voor nieuwe problemen. Ze worden vooral gebruikt voor draagbare

toepassingen zoals laptops. Hier komt de eenvoudigere opslag goed van pas. (fuelcellpark.com, 2007) Smart Fuel Cell (2007) werkt met DMFC's omdat ze goedkoper zijn. Ze gebruiken wel een platina katalysator.

- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)

PAFC's hebben een werkingstemperatuur rond 200 °C en gebruiken fosforzuur als elektrolyt. Ook deze brandstofcel is gevoelig voor onzuiverheden aan de anode, maar minder dan de PEM. (VSB, 2007) Ze hebben een iets hogere tolerantie voor CO dan andere brandstofceltypes. Dit type brandstofcel is het meest commercieel ontwikkeld en wordt vooral toegepast in stationaire applicaties. Ze wordt vaak gebruikt voor de cogeneratie van warmte en elektriciteit of warmtekrachtkoppeling. Voor deze toepassing kunnen ze een efficiëntie van 85 % bereiken. (USDOE, 2007) Een nadeel is dat de PAFC een opwarmingsperiode nodig heeft voordat er energie wordt geproduceerd. Dit maakt het moeilijk om ze in transportapplicaties te gebruiken. Bovendien is de PAFC groot en zwaar. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Dat ze groot en zwaar is, is te wijten aan het feit dat ze per eenheid volume minder vermogen kan genereren dan andere brandstofcellen. (USDOE, 2007) Deze brandstofcel heeft ook maar een kleine energiedichtheid. (California Energy Department, 2007) Wanneer de temperatuur daalt onder 42 °C begint de brandstofcel te verkrumelen. Dit proces is irreversibel. (fuelcellpark.com, 2007)

- AFC (Alkaline Fuel Cell)

Deze brandstofcellen gebruiken een KOH-oplossing (kaliumhydroxide) als elektrolyt. (VSB, 2007) Ze worden gebouwd met relatief goedkope componenten. Hierdoor zijn ze echter zeer gevoelig voor CO₂-vervuiling. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b; USDOE, 2007) Alkaline brandstofcellen zijn al vaak toegepast in ruimtevaarttoepassingen. Momenteel wordt er onderzoek gedaan naar de toepassing van AFC's in wagens, maar ze hebben het grote nadeel dat ze enkel met zuivere zuurstof gevoed kunnen worden – en niet met omgevingslucht. Dit maakt deze brandstofcel complexer en minder geschikt voor toepassing in auto's. Bovendien is hun levensduur beperkt. Ze kunnen wel toegepast worden in niche-applicaties, omdat ze zelfs in kleine aantallen vrij goedkoop kunnen geproduceerd worden. (fuelcellpark.com, 2007)

Hoge temperatuur brandstofcellen

In het algemeen zijn deze efficiënter dan lage temperatuurbrandstofcellen voor het genereren van elektriciteit. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Deze brandstofcellen hebben bovendien het voordeel dat ze gewoon met klassieke brandstoffen kunnen gevoed worden. Door de hoge temperatuur wordt een complexe brandstof ontbonden tot een waterstofrijke brandstof. Volgens het VSB (2007) is hun efficiëntie zelfs 45 tot 55 %.

- Solid oxide FuelCell (SOFC)

Dit type brandstofcel gebruikt keramiek als elektrolyt. Ze zijn goed bestand tegen onzuiverheden en werken bij een temperatuur tussen 800 °C en 1 000 °C. Door het gebruik van keramiek hebben

ze minder problemen met corrosie waar vloeibare elektrolyten wel onder te lijden hebben. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Ze hebben een grote energiedichtheid. (California Energy Department, 2007) De SOFC heeft een lange opstarttijd van 1 h en zwavel is nefast voor de werking. (VSB, 2007) Bovendien zijn er thermische afscheidingen nodig om mensen tegen de hoge temperatuur te beschermen. In transportapplicaties is dit onaanvaardbaar. (USDOE, 2007)

- Molten Carbonate FuelCell(MCFC)

Deze brandstofcel heeft een werkingstemperatuur tussen 600 en 650 °C. Hierdoor is ze in staat om intern brandstoffen op basis van waterstof (H) en koolstof (C) om te zetten. De MC-brandstofcel heeft een hoge efficiëntie. Ze wordt vooral gebruikt in stationaire toepassingen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Omdat ze op een dergelijk hoge temperatuur werken, kunnen niet-edele metalen als katalysator gebruikt worden, wat de kost aanzienlijk drukt. (USDOE, 2007) Het elektrolyt is een gesmolten zout. (VSB, 2007) Een voordeel is dat de binnenkomende gassen niet gezuiverd moeten worden door de hoge temperatuur. Bovendien wordt deze brandstofcel niet aangetast door CO. (fuelcellpark.com, 2007) De opstarttijd van deze brandstofcel bedraagt 10 h. Door de hoge temperatuur treden er corrosieproblemen op.

Een samenvatting van de verschillende brandstofceltypes wordt in de tabel 10 gegeven.

Tabel 10: Schematisch overzicht van de verschillende brandstofceltypes

Fuel Cell Type	PEM	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Operating Temperature (°C)	70-80	80-100	200-220	600-650	800-1000
Current Density	High	High	Moderate	Moderate	High
Stage of Development	Early prototypes	Space applications	Early commercial applications	Field demonstrations	Laboratory demonstrations
Likely Applications	Electric utility portable power and transportation	Military and space	Electric utility and transportation	Electric utility	Electric utility
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • Low temperature • Quick start-up • Solid electrolyte reduces corrosion and management problems 	<ul style="list-style-type: none"> • High performance 	<ul style="list-style-type: none"> • High efficiency for cogeneration • Can use impure hydrogen fuel 	<ul style="list-style-type: none"> • High efficiency • Flexibility of fuels 	<ul style="list-style-type: none"> • High efficiency • Flexibility of fuels • Solid electrolyte reduces corrosion and management problems
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> • High sensitivity to fuel impurities • Requires expensive catalysts 	<ul style="list-style-type: none"> • Expensive removal of carbon dioxide from fuel and air supplies 	<ul style="list-style-type: none"> • Low current and power • Large size and weight 	<ul style="list-style-type: none"> • High temperature enhances corrosion and breakdown of cell components 	<ul style="list-style-type: none"> • High temperature enhances corrosion and breakdown of cell components
Prospect for High Efficiency	Good	Good	Good	Good	Good
Prospect for Low Cost	Good	Good	Fair	Fair	Fair-Good

Bron: NAVC (2000) geciteerd door JRC, IPTS en ESTO (2003b: 40)

Ovonic (2007) ontwikkelde brandstofcellen waarbij in de anode een metaalhydride verwerkt is voor de opslag van waterstof. Het voordeel van deze techniek is dat het een lage kost technologie is met vele voordelen. De brandstofcellen hebben geen opstarttijd nodig, maar kunnen onmiddellijk gestart worden zelfs bij vriesweer. Dit maakt hen uiterst geschikt als back-up stroomvoorziening. Bovendien kunnen ze een korte tijd werken zonder dat er waterstof wordt toegevoerd. Deze buffer capaciteit kan bijvoorbeeld gebruikt worden om de brandstoftank te vervangen. Omdat ze geen

edele metalen en dure membraantechnologieën gebruiken, zijn ze veel goedkoper dan de andere brandstofcellen. Bovendien gebruiken ze analoge productieprocessen als voor de productie van commerciële batterijen. Op termijn zouden deze brandstofcellen ook gebruikt kunnen worden voor auto's en andere transporttoepassingen. De brandstofcellen kunnen gebruik maken van recuperatie van remenergie. Ovonic (2007) heeft voorlopig wel al concrete plannen voor commercialisering van de brandstofcel voor militaire applicaties, stationaire toepassingen en voertuigtoepassingen zoals scooters en vorkliften.

4.8.3.5 Balance of plant

Behalve de brandstofcelstack en de brandstof zelf zijn er nog andere devices nodig in een brandstofcelvoertuig. Deze devices worden vaak aangeduid met de term "Balance of plant". Vooreerst moet de lucht samengedrukt worden om de hoeveelheid zuurstof in de stack te doen toenemen, waardoor er dus compressors nodig zijn. Dan is er nog een koeling noodzakelijk om de temperatuur die stijgt bij samendrukking van de lucht voldoende laag te houden. Ook filters zijn vereist om de lucht, waterstof en waterstroom zuiver te houden. En er is een onderdeel nodig dat zorgt dat alle stromen bewegen. Bovendien moeten de inkomende gasstromen vochtig gehouden worden zodat het membraan niet kan uitdrogen. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Wanneer het membraan uitdroogt, verlaagt de geleiding van de ionen. Hierdoor dalen de prestaties van de brandstofcel volgens het USDOE (2007). Wanneer er geen reformer aan boord is, moet er om de gasstromen te bevochtigen een extra reservoir met water voorzien worden. Het water dat gevormd wordt in de stack, kan dan teruggevoerd worden naar het reservoir, zodat het proces zichzelf onderhoudt. In een voertuig met een reformer moet er al water aanwezig zijn om de reformatie te kunnen uitvoeren. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b)

Wanneer de kosten van de brandstofcelstack gaan dalen door grotere efficiëntie en kleinere hoeveelheden edele metalen die gebruikt worden, zal de kost van de balance of plant relatief een grotere rol gaan spelen in de totale kost van het systeem. Ook aan de balance of plant componenten moet bijgevolg aandacht gegeven worden om deze te vereenvoudigen en hun kost te laten dalen. Sommige van deze componenten zijn echter relatief volwassen technologieën en hun potentieel voor kostenreductie is dus kleiner dan bij de stack.(Carlson, 2005)

4.8.3.6 Overzicht van de activiteiten van de belangrijkste autoconstructeurs

Er zijn reeds brandstofcellen commercieel beschikbaar voor verschillende toepassingen. (Nuvera, 2007) In de transportsector zijn er echter alleen nog maar prototypes bij de verschillende constructeurs. Sommigen worden wel al uitvoerig getest op de baan, onder verschillende omstandigheden.

DaimlerChrysler verwacht 100 000 brandstofcelvoertuigen op de markt te kunnen brengen tegen 2015. Ze zeggen zover te zijn dat hun brandstofcelvoertuigen nog slechts 1 kg/100 km waterstof nodig hebben, wat overeenkomt met een equivalent van ongeveer 3,4 l/100 km benzine. De afstand die het voertuig kan afleggen is ongeveer 230 km. (Fuel Cell Today, 2006b) De constructeur laat 60 brandstofcelvoertuigen door gewone mensen, die allemaal een verschillende eigen rijstijl hebben, testen in vier verschillende regio's over de hele wereld. (DaimlerChrysler, 2007) In de F600 Hy^{Genius} wordt een nieuwe membraantechnologie toegepast en wordt een pas gemaakt bevochtigingssysteem gebruikt. Deze twee technieken zorgen ervoor dat er niet langer vloeibaar water in de stack kan verzameld worden zodat koude start problemen vermeden worden. Er worden metalen plaatjes gebruikt in plaats van koolstofelektrodes, zodat de geleiding van protonen verbetert. (DaimlerChrysler, 2007)

Honda's nieuwste brandstofcelcreatie is de Honda FCX Concept. Deze is 180 kg lichter dan de vorige versie en hierdoor efficiënter. De wagen wordt aangedreven door gasvormige waterstof die in een tank onder een druk van 350 bar wordt opgeslagen (of 35 MPa) en kan 570 km afleggen met een volle tank. Verder is de wagen voorzien van een Li-ion batterij die remenergie regenereert. Het is dus een hybride brandstofcelvoertuig. (Honda, 2007) Honda vermeldt verder dat het niet het belangrijkste is om de eerste te zijn, maar dat het de hoofdzaak is dat eender welke autoconstructeur het eerste is, de eerste brandstofcelwagens ontworpen zijn met een extreem goede kwaliteit en dat ze een zeer positieve indruk nalaten bij de klanten. (Fuel Cell Today, 2007) Het hoofddoel van de autoproducent is naar eigen zeggen tweeledig. Ze willen brandstofcellen aanpasbaar maken aan een grote verscheidenheid van klimaten. Bovendien willen ze massaproductie leefbaar maken. (Honda, 2007)

Ook Nissan heeft met het New X-TRAIL Fuel Cell Vehicle een hybride brandstofcelvoertuig ontwikkeld. Het bedrijf verklaart eveneens grote vooruitgang geboekt te hebben ten opzichte van het vorige prototype en zegt dat het de fuelcellstack aanzienlijk heeft kunnen verkleinen door de afstand tussen de verschillende cellen in de stack met 40 % te verminderen. Ook de levensduur is meer dan verdubbeld door verbeteringen aan de elektrodematerialen aan te brengen. De opslagcapaciteit van de tank is met 30 % verhoogd door een hoge druktank van 700 bar in plaats van 350 bar te gebruiken. De wagen kan een afstand van 500 km afleggen. (Nissan, 2007)

Nuvera ontwikkelt samen met Fiat Powertrain en Centro Ricerche Fiat een brandstofcel voor transportdoeleinden. Deze wordt uitvoerig getest in de Fiat Seicento en de Fiat Panda. Nuvera ontwikkelde een brandstofcelsysteem dat een piekvermogen heeft van 82 kW en dat kan opgestart worden bij temperaturen onder 0 °C. Deze wordt in de Fiat Seicento gebruikt. Een ander brandstofcelsysteem, de Andromeda HCS-575 PEM, werkt zonder de waterstof- of luchtstroom te bevochtigen. Hierdoor wordt de balance of plant eenvoudiger. Ook kan er om deze reden sneller opgestart worden bij vriestemperaturen. Zelfs bij -30 °C wordt binnen 30 s 50 % van het vermogen bereikt. Bovendien heeft Nuvera ervoor gezorgd dat ze bij lagere druk kunnen werken, waardoor de kost van het brandstofcelsysteem daalt doordat er geen dure compressor nodig is. De levensduur kan verlengd worden en verdere kostenvoordelen worden behaald doordat Nuvera de enige producent van brandstofcellen is die metalen platen zonder coating erover kan gebruiken, in plaats van koolstofelektrodes. (Nuvera, 2007)

Bij Fiat is er een hele evolutie zichtbaar. In de Seicento Elettra H2 in 2001 werd de brandstofcel gebruikt als extra hulp voor de batterijen, maar werd de wagen vooral aangedreven door batterijen. In de Panda Hydrogen echter, wordt er geen batterij meer gebruikt. De wagen wordt enkel aangedreven door brandstofcellen vervaardigd door Nuvera. (Fiat, 2007)

Ook Ford (2007) gelooft in waterstof als de brandstof van de toekomst. Dit bedrijf test wagens aangedreven door waterstof en tevens waterstofinfrastructuur in reële omstandigheden. Ford ontwikkelde dit jaar de Airstream-concept. Dit hybride voertuig wordt aangedreven door een Li-ion batterij, die wordt opgeladen door de brandstofcel. (FuelCells2000, 2007) Ford (2007) beschouwt de waterstofmotor als een belangrijke stap naar de waterstoftoekomst, maar brandstofcellen zijn het ultieme doel.

Mazda (2007) gebruikt waterstof in een verbrandingsmotor. De RX-8 Hydrogen RE rijdt op pure waterstof. Omdat Mazda de motor op grote schaal produceert, kan het bedrijf de RX-8 Hydrogen RE competitief prijzen. Mazda leest het voertuig tegen 420 000 JPY/maand, wat overeenkomt met 2 646 EUR/maand. Deze prijs is lager dan die van de brandstofcelwagens wat het volgens Mazda voor de consument gemakkelijker maakt om de overstap naar schone voertuigen te maken. De wagen kan op zowel waterstof als benzine rijden, wat het voertuig nog meer toegankelijk maakt voor het publiek. Bovendien kan de wagen op die manier gebruikt worden zonder geografische beperkingen omdat hij minder afhankelijk is van de waterstoftankstations. Het voertuig kan 100 km afleggen op waterstof en 549 km op benzine. Mazda ziet de waterstofverbrandingsmotor als iets voor op lange termijn en geen tussentijdse technologie tot de brandstofcelwagens op punt staan.

Toyota (2007) ontwikkelde de FINE-X in 2005 maar hier zijn geen specificaties over bekend. Ook over de FINE-S en de FINE-N zijn geen specificaties bekend.

In onderstaande tabel wordt er een overzicht gegeven van de meest recente bezigheden van enkele constructeurs op het gebied van wagens aangedreven door een brandstofcel. Hieruit blijkt dat de meeste brandstofcelvoertuigen gasvormige waterstof gebruiken.

Tabel 11: Overzicht van de constructeurs

Constructeur	Jaar	Naam voertuig	Vermogen Fuelcell-stack	Brandstof	Maximale snelheid	Brandstof-cel	Druk van de tank indien H ₂ -gas	Batterij
Audi	2004	A2H2	63 kW	gasvormig	175 km/h	PEM	350 bar	ja
DaimlerChrysler	2007	Hydro-GEM	5 kW	gasvormig	40 km/h	PEM	200 bar	ja
DaimlerChrysler	2005	F600 Hy ^{Genius}	60 kW	gasvormig	169 km/h	PEM	700 bar	Li-ion
DaimlerChrysler	2002	F-Cell	85 kW	gasvormig	140 km/h	PEM	350 bar	ja
Fiat	2006	Panda Hydrogen	60 kW	gasvormig	130 km/h	PEM	350 bar	nee
Fiat	2001	Seicento Elettra FC	7 kW	gasvormig	100 km/h	PEM		ja
Ford	2006	Explorer	85 kW	gasvormig		PEM	700 bar	ja
Ford	2002	Advanced Focus FCV	85 kW	gasvormig		PEM	350 bar	ja
Ford	2000	Ford Focus FCV	85 kW	gasvormig	129 km/h	PEM	248 bar	ja
General Motors	2005	Sequel	72 kW	gasvormig	145 km/h	PEM	700 bar	ja
General Motors	2002	Hy-wire	94 kW	gasvormig	156 km/h	PEM	350 bar	nee
General Motors	2001	Hydrogen 3	94 kW	vloeibaar	160 km/h	PEM	/	nee
Honda	2006	FCX Concept	100 kW	gasvormig	160 km/h	PEM	350 bar	Li-ion
Hyundai	2004	Tucson FCEV	80 kW	gasvormig	150 km/h	PEM		Li-ion
Mazda	2001	Premacy FC-EV	85 kW	Methanol	124 km/h	PEM	/	ja
Nissan	2005	New X-TRAIL FCV	90 kW	gasvormig	150 km/h	PEM	700 bar	Li-ion

Vervolg tabel 11: Overzicht van de constructeurs

Toyota	2001	FCHV-4	90 kW	gasvormig	153 km/h	PEM		ja
Volkswagen	2007	Touran HyMotion	80 kW	gasvormig	140 km/h	PEM	350 bar	ja
Volkswagen	2002	HyPower	40 kW	gasvormig	100 km/h	PEM		

Bron: op basis van USFCC (2005a), Fuelcell2000 (2007) en de verschillende autoconstructeurs die in het overzicht werden opgenomen

Deze tabel toont aan dat de verschillende autoconstructeurs toch sterk bezig zijn met de ontwikkeling en verbetering van brandstofcelwagens.

4.8.3.7 Conclusie

Voordat brandstofcellen gecommmercialiseerd kunnen worden moeten dus vooral de kost, het gewicht en de grootte van de brandstofcellen verminderd worden. Betrouwbaarheid en levensduur moeten aangetoond en verzekerd worden. Voor een personenwagen wordt de nodige levensduur van de brandstofcel geschat op ongeveer 5 000 uren. (Ballard, 2007) Jammer genoeg is er een trade-off tussen de verschillende factoren die nog moeten geoptimaliseerd worden. Wanneer men de levensduur wil verlengen is er bijvoorbeeld meer platina nodig, waardoor de kost stijgt. Voor integratie in het voertuig en voor minimalisatie van de kosten, tracht men de grootte en het gewicht van de brandstofcel te verlagen, terwijl men voor een minimaal brandstofverbruik een maximale efficiëntie moet bereiken. Helaas, wanneer men de efficiëntie wil verbeteren, nemen ook de grootte, het gewicht en de kost van het systeem toe. (Carlson et al., 2005)

Bovendien moet de infrastructuur voor distributie van waterstof uitgebouwd worden en moet het publiek de waterstoftechnologie steunen. Ook de productiemethodes moeten geoptimaliseerd worden. Volgens Fuel Cell Today (2006b) moet men wel oppassen dat wanneer de datum dat de brandstofcelvoertuigen echt op de markt komen niet te hard wordt uitgesteld, want dan wordt de markt misschien gedomineerd door hybrides en auto's met een waterstofverbrandingsmotor.

Brandstofcelwagens hebben te lijden onder het probleem van de kip of het ei. Zolang er niet voldoende infrastructuur is om brandstofcelwagens te bedienen, zullen autoconstructeurs ze niet massaal gaan produceren, wat nodig is om de kosten naar beneden te helpen. Overheden en bedrijven daarentegen willen niet in een waterstofinfrastructuur investeren zolang er niet voldoende brandstofcelwagens op de markt zijn om gebruik te maken van de infrastructuur. (Fuel Cell Today, 2007) Het is wel zo dat er een ondersteunende waterstofinfrastructuur nodig is voor brandstofcelvoertuigen om hen in de praktijk te kunnen gebruiken, maar het is niet nodig om in één keer een volledig ontwikkelde infrastructuur aan te leggen. De eerste waterstoftankstations

zijn nodig om een beperkte infrastructuur te voorzien voor de demonstratievoertuigen en commerciële verkoopdoeleinden, maar ook om de verschillende manieren waarop waterstof wordt geproduceerd en opgeslagen te onderzoeken en aan te tonen. (USFCC, 2005a) Bovendien kan men de kosten en de uitbouw van een pijpleidingennetwerk beperken door kleinschalige waterstofproductie-installaties te gebruiken bij lokale pompstations. Hierdoor is er niet een zodanig uitgebreid netwerk nodig. (Rifkin, 2002)

De meeste autoconstructeurs denken rond de periode tussen 2010 en 2015 commerciële brandstofcelwagens op de markt te kunnen brengen. Nochtans denken vele anderen dat 2020 – 2025 een realistischer tijdsbestek is om met commercialisering op grote schaal te beginnen. (Fuel Cell Today, 2007)

4.8.3.8 Brandstofcel of verbrandingsmotor

Wanneer er zou overgegaan worden naar een waterstofeconomie, is het niet duidelijk of dan best verbrandingsmotoren of brandstofcellen gebruikt worden. Hieronder worden de voor- en nadelen van beide technologieën nog eens op een rijtje gezet. Hydrogen and Fuel Cells Canada (2007) vermeldt dat de waterstofverbrandingsmotor ook als overgangstechnologie kan gebruikt worden, waardoor ze het voordeel bieden dat ze de uitbouw van een waterstofinfrastructuur stimuleren die later kan gebruikt worden door de brandstofcelvoertuigen.

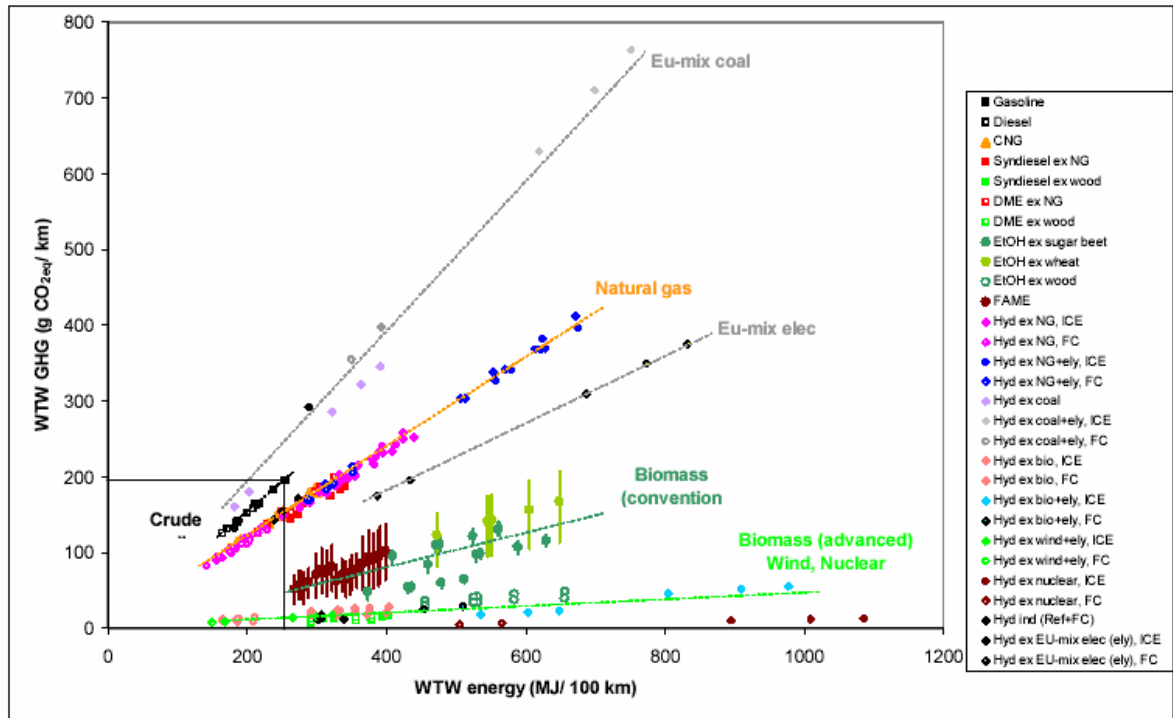
Tabel 12: Schematisch overzicht van brandstofcel en verbrandingsmotor

<u>Brandstofcel</u>		<u>Verbrandingsmotor</u>	
<u>Voordelen</u>	<u>nadelen</u>	<u>voordelen</u>	<u>nadelen</u>
Geen NO _x -uitstoot	Duur	Goed gekende technologie	Eventueel meer lawaai
Potentieel tot hoge efficiëntie	Brandstof moet zuiver zijn	Goedkoop	Toch nog uitstoot van NO _x
Modulair, kan aangepast worden aan de noden	Eventueel koude startproblemen	Flexibel: bi-fuel	
Weinig bewegende delen	Potentieel tot lage emissies	Potentiële efficiëntie	
Potentieel voor sociale gelijkheid	Gebrek aan infrastructuur	Bruikbaar voor retrofit	
Stil		Minder afhankelijk van aanvoer waterstof	

Pecqueur (2007b) denkt dat de weg naar waterstof in ieder geval langs de verbrandingsmotor op mengsels van waterstof en aardgas loopt. Omdat de motor kan werken op mengsels met verschillende hoeveelheden waterstof en aardgas, kan de samenstelling gewijzigd worden naargelang de aanvoer van waterstof. In tankstations waar minder waterstof aangevoerd wordt, bevat de brandstof dan relatief minder waterstof. Brandstofcellen zouden volgens Pecqueur (2007b) over vijftien tot twintig jaar een haalbaar alternatief voor de conventionele motoren kunnen vormen, maar momenteel staat de technologie nog in zijn kinderschoenen. Bovendien zijn de brandstofcellen nu te duur. De gebruikte waterstof moet immens zuiver zijn, wat moeilijkheden geeft voor productie in grote hoeveelheden. De economie moet volgens Pecqueur (2007b) geleidelijk omgevormd worden. Er is een te grote financiële injectie nodig op dit moment, en niemand is bereid die momenteel te geven.

4.8.4 Conclusie

Een verschuiving naar hernieuwbare bronnen of bronnen met minder koolstofinhoud kan de uitstoot van broeikasgassen sterk verminderen, maar meestal vereist deze methode meer energie. Bepalend is de specifieke weg waarop deze brandstoffen geproduceerd en geleverd worden of bij brandstofcellen hoe de elektriciteit geproduceerd wordt. Geen enkele alternatieve brandstof of aandrijfvorm levert een korte termijnoplossing voor grote volumes brandstof. Biobrandstoffen en brandstofcellen hebben nog te kampen met hoge kosten en efficiëntieproblemen. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006) Een betere energie-efficiëntie kan enkel bereikt worden door een combinatie van de meest efficiënte omzetters zoals brandstofcellen en de meest verkiesbare brandstofproductieroute te gebruiken. (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004) Volgende grafiek geeft een overzicht van gebruikte energie en uitgestoten broeikasgassen voor verschillende combinaties van aandrijfvormen en brandstoffen. Enkel de combinaties dicht bij de oorsprong zijn aantrekkelijk.



Figuur 17: Well-to-Wheels-energie en broeikasgasemissies voor verschillende combinaties van productieroutes en aandrijfvormen (CONCAWE, EUCAR en JRC, 2004: 18)

Bovendien hebben de alternatieve technologieën nog steeds te lijden onder het ontbreken van een infrastructuur, beschikbaarheid van brandstof en de publieke opinie die niet altijd positief is. Ze worden door de consument niet als alternatieven gepercipieerd. (JRC, IPTS en ESTO, 2003a) Van Mierlo (2006) vult hierbij aan dat milieuvriendelijke voertuigen nog te kampen hebben met problemen op het vlak van service, onderhoud, dienst na verkoop en marketing.

4.8.5 Projecties

JRC, IPTS en ESTO (2003c) voorspellen dat de verdieselijking van het wagenpark nog zal doorgaan, minstens tot 2010. Daarna zal er overgegaan worden op hybride voertuigen, die vanaf dan competitieve prijzen zouden hebben. Elektrische voertuigen zullen slechts een klein deel van de markt innemen en brandstofcelvoertuigen zouden pas op langere termijn terrein winnen. Er zullen volgens dit rapport toch steunmaatregelen nodig zijn om de introductie van alternatieve technologieën te versnellen en in elk geval moeten de autoproducenten willen meewerken aan de introductie. Als zij niet willen investeren in alternatieve technologieën, zullen deze nooit op de markt komen.

In het rapport worden verschillende scenario's bekeken. Een stijging van de olieprijs zal op lange termijn de introductie van alternatieven ten goede komen, omdat het prijsverschil met conventionele technologieën op het vlak van variabele kosten dan kleiner wordt. Bovendien zal de verschuiving van benzine naar diesel nog groter worden omdat dieselveertuigen efficiënter zijn en minder brandstof verbruiken. De CO₂-uitstoot zal dalen doordat de voertuigvraag in mindere mate zal toenemen en er een verschuiving is naar efficiëntere alternatieven. Wanneer de olieprijs zouden dalen zal er zich natuurlijk een omgekeerde situatie voordoen. CO₂-emissies zullen stijgen doordat de transportvraag blijft toenemen en de introductie van alternatieven wordt uitgesteld. Brandstofefficiëntie is dan minder belangrijk. Wanneer er een CO₂-belasting wordt ingesteld van 50 EUR/ton CO₂, zal de introductie van alternatieve technologieën versneld worden, maar benzine zal relatief goedkoper worden dan diesel doordat diesel een hogere koolstofinhoud heeft en er dus op diesel een hogere belasting zal moeten betaald worden. Elektrische en vooral hybride voertuigen zullen een groter aandeel behalen in de voertuigmarkt dan in het baselinescenario zonder extra steunmaatregelen van overheidswege. In het scenario dat er een subsidie wordt gegeven bij de aankoop van hybride wagens of brandstofcelvoertuigen, wordt hun introductie in de markt versneld. Het is in al deze gevallen belangrijk dat autoproducenten bereid zijn in de alternatieve technologieën te investeren en ze te ontwikkelen. De variabelen die de introductie van alternatieve technologieën het meest beïnvloeden, zijn variabelen die samenhangen met de kost van de alternatieven. Tot 2020 zullen diesel en benzine zeker de belangrijkste technologieën blijven. Als de kosten meer dan 20% hoger worden dan de kosten voorspeld in de tabel 13 die hieronder worden weergegeven, dan zal geen enkel alternatief belangrijk worden.

Tabel 13: Projectie van de kosten van verschillende alternatieven (EUR)

Year	2000	2005	2010	2015	2020
Light gasoline	16,047	15,548	15,070	14,553	14,055
Large gasoline	27,240	26,418	25,630	24,869	24,140
Light diesel	19,590	16,279	15,580	15,055	14,550
Large diesel	36,692	28,995	27,600	26,347	25,160
Electric	n/a	36,437	28,840	25,790	23,064
Fuel cells	n/a	n/a	43,760	32,245	24,800
Hybrid	n/a	25,688	23,740	20,867	18,424

Bron: JRC, IPTS en ESTO (2003c: 16)

Hybride voertuigen en brandstofcellen hoeven niet persé concurrenten te zijn. Het onderzoek en de ontwikkeling kunnen voor beide technologieën plaatsvinden door de technologieën als introductiestadia in een continuüm te zien: hybride wagens in de nabije toekomst en brandstofcellen voor de lange termijn. (JRC, IPTS en ESTO, 2003b) Ook in het verslag van Fuel Cell Today (2006b) worden hybride wagens en brandstofcelvoertuigen niet als concurrenten genoemd, maar worden hybride auto's eerder bekeken als een overbruggingsfase tot de brandstofcelwagens

op de markt zullen zijn. Zo hebben de autoconstructeurs meer tijd om de brandstofcelvoertuigen te ontwikkelen. Fuelcells2000 (2007) gaat hiermee akkoord. Volgens Pecqueur (2007b) zal de hybride vorm in elk geval blijven bestaan in de toekomst. Hier is geen weg naast volgens hem. De zuivere brandstofcelwagen zal er niet komen, omdat deze het moeilijker heeft met snelle belastingen. Bovendien kan recuperatie van de remenergie het rendement van de wagen ook verhogen.

Bossel, Eliasson en Taylor (2005) zien in biobrandstoffen de oplossing voor de energieproblematiek in het transport. Maar in België is hier niet voldoende landbouwareaal voor beschikbaar. België zou dus afhankelijk blijven van andere landen voor de toevoer van brandstof. Bovendien zijn veel van de grondstoffen voor biobrandstoffen voedingsproducten. Het gebruik ervan voor de productie van biobrandstoffen kan bijgevolg de voedselprijzen de hoogte in jagen.

Om te voorspellen welke de aandrijftechnologie van de toekomst wordt, is veel afhankelijk van de evoluties die zullen gebeuren op het vlak van de verschillende technologieën. De nanofiber-technologie lijkt veelbelovend om de waterstofopslag sterk te verbeteren. Wanneer hier doorbraken gebeuren kan het allemaal zeer snel gaan. Als deze opslagmethode een zeer grote autonomie zou kunnen verlenen aan de wagen, in het gebied van 4 000 tot 5 000 km bijvoorbeeld, dan zouden gebruikers er nadelen zoals een lange tanktijd van enkele uren bijnemen. Wanneer de tank maar vier keer op een jaar meer moet bijgevoerd worden, is dat niet zo onoverkomelijk. Het bijkomende gewicht van de opslagtechniek, is dan ook aanvaardbaar. Maar daarvoor is wel eerst nog een doorbraak in de opslagtechnologie nodig. (Pecqueur, 2007b) De weg naar waterstof zal in elk geval enkel langs een geleidelijke transitie verlopen. ECN (2007) denkt dat de eerste toepassingen van waterstoftechnologie in de vervoerssector vooral zullen plaatsvinden bij bedrijfswagens voor transport op bedrijfsterreinen.

De grootste bedreiging voor de brandstofcel wordt volgens Pecqueur (2007b) de performantie van de batterij. Wanneer deze sterk verbeterd kan worden, zal er een sterke opgang van de zuiver elektrische wagens plaatsvinden. Hun grootste nadeel, de beperkte afstand die ze tussen twee tankbeurten kunnen afleggen, wordt daarmee weggenomen. De brandstofcel wordt dan een overbodige omweg om elektriciteit in op te slaan. De batterij kan dan gebruikt worden als drager van de elektriciteit.

5 KOSTEN EN BATEN

In dit hoofdstuk worden de private kosten en de vermeden externe kosten van de verschillende alternatieven voor personenwagens bekeken. De vermeden externe kosten kunnen als baten beschouwd worden. In dit hoofdstuk wordt dus een soort kosten-batenanalyse verricht. Meer beknopte informatie over dit soort analyses is opgenomen in bijlage 8. Een eerste onderdeel van de private kosten is de aanschafkost van de wagen, die werd berekend door de gemiddelde aanschafprijs voor een benzinewagen te verminderen met de kosten voor de brandstoftank en de aandrijving omdat deze laatste twee soorten kosten verschillen voor de verscheidene alternatieven. Zo kan er voor elk alternatief een totaal kost berekend worden zonder een volledige opsplitsing te maken naar kosten van banden, koetswerk en dergelijke omdat deze kosten niet wijzigen door een ander alternatief te gebruiken. De kosten van de brandstoftank en van de aandrijving werden apart opgenomen als een private kost. De brandstofprijs zonder accijnzen is eveneens een private kost evenals de kosten van onderhoud, smeermiddelen en olie. In de berekeningen met belastingen en accijnzen, komen hierbij nog de accijnzen op de benzine, de verkeersbelasting op benzine en LPG, de belasting op inverkeerstelling, de bijkomende belasting voor LPG-voertuigen en de subsidie op de aanschaf van een voertuig met een CO₂-uitstoot onder 105 g/km respectievelijk minder dan 115 g/km. De vermeden externe kosten die zijn opgenomen is een kwantificering van de schade die niet aan het milieu wordt toegebracht door een alternatieve technologie te gebruiken in plaats van een benzinewagen.

De dieselwagen werd niet opgenomen in de analyse omdat dit niet als een milieuvriendelijk alternatief voor de benzinewagen wordt beschouwd. Het gebruik van diesel vermindert de olieafhankelijkheid niet. Bovendien gaat deze eindverhandeling over het gebruik van alternatieven, niet over efficiëntieverbeteringen aan bestaande technologieën.

5.1 Vergelijking tussen verschillende alternatieven

5.1.1 Assumpties

Voor de berekening van de vermeden externe kosten wordt uitgegaan van een referentievoertuig met de emissiegegevens die weergegeven worden in onderstaande tabel 14. Deze tabel heeft betrekking op een benzinevoertuig dat aan de Euro 4-norm voldoet en door VUB, VITO en CEESI (2005) werd gebruikt als referentievoertuig voor de berekening van de Ecoscore. De Tank-to-Wheels- en de Well-to-Tank-waarden moeten opgeteld worden om tot één globale waarde voor het voertuig te komen. Voor de geluidsemissie wordt – in tegenstelling met de tabel – een waarde van 74 dB(A) (op 7,5 m afstand van het voertuig) genomen, omdat dat momenteel de norm is voor het motorgeluid van benzinewagens.

Tabel 14: Emissiegegevens referentievoertuig

	Geluid	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO	HC	NO _x	PM	SO ₂	verbruik
	[dB(A)]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[l/100km]
Tank-to-Wheel	70	120	0.005	0.02	1	0.1	0.08	0	0.0041	5.48
Well-to-Tank		16.2	0	0.03	0.009	0.37	0.07	0.004	0.12	0.49

Bron: VUB, VITO en CEESE (2005:7)

De berekening van de vermeden milieuschade gebeurt door het berekende bespaarde emissieniveau te vermenigvuldigen met de schadefactor die bij de schadecategorie hoort. Het bespaarde emissieniveau wordt berekend door het verschil te maken tussen de uitstoot van het referentievoertuig en het alternatieve milieuvriendelijkere voertuig en wordt uitgedrukt in g/km. De verschillen worden berekend op basis van de percentages van vermindering van de uitstoot uit Van Mierlo et al. (2006), VUB, VITO en CEESE (2005) en Emis (2007). Deze percentages worden in de volgende tabel 15 weergegeven. De schadefactoren worden weergegeven in de tabel 16. De percentages in tabel 15 zijn Well-to-Wheels-percentages en houden dus eveneens rekening met de productie en distributie van de brandstof. Van Mierlo et al. (2006) gebruikten voor de berekening van de indirecte emissies bij de elektrische wagen de gemiddelde samenstelling van de elektriciteitsmix in België. Dezelfde samenstelling van de elektriciteitsmix wordt gehanteerd in de berekening bij de vermindering van de emissies bij het gebruik van brandstofcellen. Ook om de emissies voor een waterstofverbrandingsmotor te berekenen, werd rekening gehouden met de indirecte emissies bij de productie van waterstof, die dan zou gebeuren met de gemiddelde elektriciteitsmix in België. Om de reductie aan CO te berekenen, werd gebruik gemaakt van tabel 15 en werd steeds het gemiddelde tussen de twee percentages per aandrijfvorm genomen. Er kunnen alternatieve berekeningen gebeuren wanneer er van wordt uitgegaan dat de elektriciteit wordt opgewekt met hernieuwbare bronnen. De emissies van elektrische wagens en brandstofcellen zijn dan nul voor alle componenten. De uitstoot van de waterstofverbrandingsmotor wordt eveneens sterk gereduceerd, maar er blijven wel NO_x-emissies en kleine hoeveelheden uitstoot van CO en NMVOS.

Tabel 15: Emissiepercentages (uitgedrukt in % ten opzichte van de benzinewagen)

	CO ₂	CO	SO ₂	NO _x	NMVOs	PM ₁₀
Benzine	100	100	100	100	100	100
LPG Euro 4	93	15-80	54	90	41	68
Aardgas Euro 4	77	25-80	25	28	24	34
Hybride Euro 4	67	10	61	39	54	61
Elektrisch	27	1	43	38	1	70 ^a
Elektrisch	27	1	43	38	1	132 ^a
Biobrandstoffen	50-65*	50-82	100	75**	50-156	65***
Waterstofverbrandingsmotor	30	60	43	300	2	70
Brandstofcellen	27	1	43	38	1	70

Bron: op basis van VUB, VITO en CEESE (2005: 29), Timmermans (2005) geciteerd door Van Mierlo et al. (2006: 477), Emis (2007) en eigen veronderstellingen

^a VUB, VITO en CEESE (2005) vermelden dat de uitstoot van fijn stof bij een elektrische wagen tussen 65 % en 75 % ligt van die van de benzine wagen. Van Mierlo et al. (2006) zeggen echter dat bij een elektrische motor de PM-uitstoot 32 % hoger ligt dan bij de benzine wagen. Omdat deze waarden zover uit elkaar lopen, worden de twee scenario's hier berekend.

* Volgens Van Mierlo et al. (2006) nemen de CO₂-emissies bij het gebruik van pure biodiesel af met 40 tot 60 % door de opname van CO₂ tijdens het groeiproces. Dezelfde auteurs en Emis (2007) schrijven dat bioalcoholen de uitstoot van CO₂ met 30 tot 40 % kunnen reduceren of zelfs nog meer, afhankelijk van de gebruikte grondstof.

**De NO_x emissies stijgen met 10 % voor biodiesel volgens Van Mierlo et al. (2006) en die van bioalcoholen dalen met 30 - 90 %. (VUB, VITO en CEESE, 2005) Gemiddeld geeft dit een daling van 25 %.

***Er wordt een daling van 10 % voor het gebruik van biodiesel aangenomen op basis van Van Mierlo et al. (2006) en een daling voor alcoholen van 60 % in overeenstemming met VUB, VITO en CEESE (2005). Dit leidt tot een gemiddelde daling van de PM₁₀ uitstoot met 35 %.

Tabel 16: Schadefactoren

<i>Effect</i>	<i>Polluent</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Schadefactoren</i>	
			<i>landelijk</i>	<i>stedelijk</i>
1) Broeikasewffect	CO ₂	GWP	1	1
	CH ₄	GWP	23	23
	N ₂ O	GWP	296	296
2) Luchtkwaliteit	-	-	-	-
2a) Menselijke Gezondheid	KWS	€/kg	3	3
	CO	€/kg	0.0008	0.0032
	PM ₁₀	€/kg	103.49	418.61
	NO _x	€/kg	1.152	1.483
	SO ₂	€/kg	6.267	14.788
2b) Ecosystemen	NO _x	€/kg	0.113	0.113
	SO ₂	€/kg	0.176	0.176
3) Geluidshinder	geluidsemissie	dB(A)	1	1

Bron: VUB, VITO en CEESE (2005: 8)

De waarden voor schadefactoren in tabel 16 wijken af van diegene die door Mayeres, Proost en Van Dender (1997) worden genoemd, dewelke veel hoger liggen. Aangezien de gegevens van VUB, VITO en CEESE (2005) recenter zijn, worden deze gebruikt voor de berekening van de vermeden externe milieukosten.

De externe effecten die een invloed hebben op de menselijke gezondheid, hebben een verschillende schadefactor voor steden en voor het platteland omdat er op het platteland minder mensen blootgesteld worden aan de schadelijke effecten. Omdat er in 2005 2 028 511 mensen in de 19 grootste Vlaamse steden – inclusief Brussel – woonden en in het Vlaamse en Brusselse Gewest samen 7 049 910 personen op 1 januari 2005 (FOD Economie, 2007) worden de vermeden externe effecten berekend met behulp van de stedelijke en landelijke schadefactoren die respectievelijk een gewicht van 29 % en 71 % toegewezen krijgen.

Voor de kosten van klimaatverandering en opwarming van de aarde wordt een schadekost van 9 EUR/ton CO₂ gehanteerd, zoals gebruikt in Bickel en Friedrich (2005). De auteurs schrijven dat deze waarde een onderschatting kan zijn omdat ze enkel schade omvat die met een redelijke zekerheid kan geschat worden. Zo is bijvoorbeeld de schade van een grotere kans op orkanen of overstromingen niet in de waarde inbegrepen. Deze kost is niet dezelfde als de vermijdingskost per ton CO₂ om het Kyoto-quotum te halen die door Bickel en Friedrich (2005) rond 19 à 20 EUR/ton CO₂ wordt geschat. Bij deze 9 EUR/ton CO₂ komt nog een kost voor opwarming van de aarde door CO die wordt uitgestoten en omgezet in CO₂ en zo ook meespeelt in het broeikaseffect. Mayeres, Proost en Van Dender (1997) wijzen hier een kost van 10,5 EUR/ton CO aan toe. Er worden scenario's met zowel 9 EUR/ton CO₂ als 20 EUR/ton CO₂ uitgewerkt.

De kosten van geluidshinder zijn gebaseerd op Mayeres, Proost en Van Dender (1997) en omgerekend naar EUR/km. De onderstaande tabel geeft de gebruikte gegevens weer. Voor de berekening wordt er rekening gehouden met een piekperiode van 7 tot 9 uur 's morgens en van 16 tot 19 uur 's avonds zoals ook door Ochelen, Proost en Van Dender (1997) gebruikt wordt. Dit komt neer op een piekperiode van ongeveer 20 % van de dag.

Tabel 17: Marginale externe kosten van geluidshinder (EUR/km)

	Piek	Dal
Personenwagens	0,001487	0,006197

Bron: op basis van Mayeres, Proost en Van Dender (1997: 77)

Er wordt in de berekeningen verondersteld dat de externe congestiekost en de externe kosten van plaatsgebruik en van schade aan het wegdek niet wijzigen door een andere aandrijftechnologie te gebruiken.

Verder wordt er aangenomen dat de levensduur van een voertuig 13 jaar is, zoals ook het rapport van IEEP (2005) veronderstelt en dat de jaarlijkse gereden afstand 15 000 km bedraagt. Deze afstand sluit aan bij Van Mierlo et al. (2006). Voor de omrekeningen per kW naar per voertuig wordt aangenomen dat het gaat om een middelgrote wagen die aangedreven wordt door een motor van 80 kW.

De waterstoftank kan 9 kg waterstof vervoeren en de hybride voertuigen hebben een batterij van 6 kWh, net zoals in het rapport van CONCAWE, EUCAR en JRC (2007). Ook de brandstofcelwagen wordt ondersteund door een batterij van 6 kWh. De brandstoftank van biobrandstoffen wordt verondersteld evenveel te kosten als die van het referentievoertuig, evenals de aandrijving. In de berekeningen werd er geen rekening mee gehouden dat brandstofcelvoertuigen efficiënter zijn dan wagens met een waterstofverbrandingsmotor en hierdoor een kleinere en lichtere tank kunnen hebben.

De geluidsemissies van de elektrische voertuigen en brandstofcelwagens worden op 64 dB(A) gesteld omdat ze zeer stil zijn. (Pecqueur, 2007b) De geluidshinder van LPG en aardgasvoertuigen wordt gelijk gesteld aan die van benzinewagens. De onderhoudskost voor aardgasvoertuigen en voertuigen met een waterstofverbrandingsmotor wordt hetzelfde geacht als die van LPG voertuigen.

Er wordt geen rekening gehouden met de inflatie in de berekening van de belastingen. Omdat het bovendien onduidelijk is hoe de belastingen op benzine en LPG zullen evolueren in de toekomst, wordt er niet verdisconteerd en bij benzine bijvoorbeeld ter vereenvoudiging een kost van 13 keer 207,96 EUR genomen, verhoogd met de gemeentelijke opcentiemen, om de verkeersbelasting over de totale levensduur te berekenen. Hetzelfde geldt voor de brandstofprijzen. Er wordt één totale brandstofkost gebruikt, alsof de investering voor de brandstof voor de totale levensduur van 13 jaar in één keer bij aankoop van het voertuig gebeurt.

Voor de schadekosten van de pollutanten wordt er evenmin verdisconteerd omdat in CESE (2004) wordt beweerd dat het niet ethisch verantwoord is om een discontovoet te gebruiken voor klimaatsvoordelen omdat het tijdsbestek verder gaat dan generaties. Ook de onderhoudskost wordt niet verdisconteerd omdat deze kan veranderen. Verdiscontering van de onderhoudskosten zou geen effect hebben op de relatieve rangschikking van de verschillende technologieën omdat de onderhoudskost van brandstofcelwagens en elektrische wagens gelijk gesteld wordt aan 70 % van de onderhoudskost van benzinevoertuigen (Emis, 2007). Deze technologieën worden ongeveer 600 EUR goedkoper. De onderhoudskost voor aardgasauto's en wagens met een waterstofverbrandingsmotor wordt gelijk gesteld aan die van LPG-voertuigen. Deze alternatieven worden ongeveer 1 000 EUR goedkoper door de verdiscontering. Dit verschil is niet groot genoeg

om de relatieve rangschikking te veranderen. De gebruikte onderhoudskosten zijn opgenomen in bijlage 9. De tabellen met de uitgebreide berekeningen kunnen in bijlage 10 gevonden worden.

In de scenario's inclusief belastingen en accijnzen wordt enkel rekening gehouden met de belastingen en accijnzen op LPG en benzine om de fiscale steunmogelijkheden aan te tonen om de alternatieven te ondersteunen. Hoewel er ook een accijnscompenserende belasting bestaat op aardgas, wordt deze hier niet beschouwd.

In de berekeningen wordt bij de aardgaswagen en de LPG-wagen een ombouwkost bij de private kosten gerekend. Deze bedraagt 2 500 EUR respectievelijk 2 000 EUR. (Van Mierlo et al., 2006) Deze ombouwkost werd opgenomen omdat op dit moment de overgrote meerderheid van LPG-wagens omgebouwde benzine-wagens zijn. (Emis, 2007) Ook aardgaswagens zijn meestal omgebouwde benzine-wagens. Bij de auto's met een waterstofverbrandingsmotor werd ook 2 500 EUR als ombouwkost genomen, omdat deze wagens aanvankelijk misschien op een mengsel van aardgas en waterstof zullen rijden volgens Hydrothane (2007) en Pecqueur (2007b). Bovendien is de door BMW gebouwde Hydrogen 7 een omgebouwde benzine-wagen. Omdat de ombouwkost voor LPG en aardgas ongeveer hetzelfde is, wordt verondersteld dat de ombouwkost naar waterstof in de buurt van deze kosten ligt. Om te trachten geen onderschatting te maken, wordt de hoogste kost – namelijk die van aardgas – genomen.

5.1.2 Samenvatting van de berekeningen

Wanneer er geen rekening gehouden wordt met BTW, accijnzen of subsidies, zijn zoals tabel 18 toont enkel de elektrische wagen en de hybride wagen rendabele alternatieven in vergelijking met de benzine-wagen. Dit geldt zolang de onderhoudskosten van de hybride wagen niet duurder wordt dan 4 878,49 EUR over de hele levensduur, rekening gehouden met de vermeden externe milieukost. Ter vergelijking kost het onderhoud van een benzine-wagen 4 220 EUR (zonder verdiscontering) (Heremans, 2007). Verdisconteerd wordt de kost van het onderhoud van een benzine-wagen 3 306,965 EUR over de hele levensduur. De berekening hiervan is opgenomen in bijlage 9. Voor de andere alternatieven kan er een subsidie of andere aanmoediging vanuit de overheid gegeven worden om ervoor te zorgen dat het alternatief voor de weggebruikers rendabel wordt ten opzichte van de benzine-auto. Zoals blijkt uit de tabel moet dit voor aardgasvoertuigen en LPG-wagens geen grote subsidie zijn, zeker niet wanneer er rekening mee gehouden wordt dat deze subsidie over de totale levensduur van de wagen, namelijk 13 jaar, kan verdeeld worden. Voor de brandstofcelwagen is er toch al een meerkost van 1 564,06 EUR per jaar, of een totale meerkost van 20 332,74 EUR. Omdat de schadekosten van 9 EUR/ton CO₂ een onderschatting kan zijn, wordt in de derde kolom van tabel 18 de berekening opnieuw gemaakt, een schadekosten van 20 EUR/ton CO₂ hanterend. Door een hogere schadekosten te gebruiken worden er niet meer

alternatieven rendabel, de conclusies blijven hetzelfde. De respectievelijke kosten van de alternatieven komen iets dichterbij die van de benzinewagen. De meerkost van een brandstofcelvoertuig wordt bijvoorbeeld ongeveer 200 EUR kleiner. Voor de berekeningen maakt het bijna geen verschil of de uitstoot van fijn stof van de elektrische wagen dan wel 30 % lager respectievelijk hoger ligt dan bij de benzinewagen. Het verschil bedraagt telkens ongeveer 100 EUR op de totale levensduur van de wagen, die in de berekeningen 13 jaar bedraagt.

De verdiscontering van de onderhoudskosten heeft geen effect op de relatieve rangschikking. Alle technologieën worden gewoon goedkoper. Benzine, LPG, aardgas, biobrandstoffen en de waterstofverbrandingsmotor worden bijna 1 000 EUR goedkoper, brandstofcelwagens en elektrische voertuigen ongeveer 600 EUR. Dit wordt getoond in bijlage 9.

Tabel 18: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (zonder belastingen)

Technologie	Kosten – vermeden externe kost (EUR) (9 EUR/ton CO₂)	Kosten – vermeden externe kost (EUR) (20 EUR/ton CO₂)
Benzine	32 230,52	32 230,52
Aardgas	38 394,66	38 327,47
Waterstofverbrandingsmotor	48 438,15	48.233,65
Biobrandstoffen	39 439,44	39 315,28
Elektrische motor (PM=70%)	30 610,76	30 397,49
Hybride (zonder onderhoud)	27 352,03	27 255,62
Brandstofcellen	52 563,26	52 349,99
LPG	36 670,95	36.650,50
Brandstofcel hernieuwbaar	52 281,66	51 989,51
Elektrische motor (PM=132%)	30 705,00	30 491,73

Wanneer dezelfde berekening opnieuw wordt gemaakt, maar dan rekening houdend met de huidige accijnzen op benzine, de verkeersbelasting en de geïndexeerde belastingvermindering van 15 % op de aankoopprijs met een maximum van 4 270 EUR wanneer de uitgestoten CO₂-hoeveelheid kleiner is dan 105 g/km, wordt tabel 19 bekomen. Wanneer de CO₂-uitstoot tussen 105 en 115 g/km CO₂ ligt, wordt er een belastingvermindering van maximaal 800 EUR toegekend. De volgende tabel geeft opnieuw de kosten weer voor de verschillende alternatieven ten opzichte van het benzine-referentievoertuig. Ook hier worden twee scenario's bekeken, namelijk enerzijds in kolom twee een schadekost van 9 EUR/ton CO₂ en in kolom drie anderzijds een schadekost van 20 EUR/ton CO₂.

Tabel 19: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (inclusief belastingen)

Technologie	Kosten – vermeden externe kost (EUR) (9 EUR/ton CO₂)	Kosten – vermeden externe kost (EUR) (20 EUR/ton CO₂)
Benzine	42 580,00	42 580,00
Aardgas	34 124,66	34 057,47
Waterstofverbrandingsmotor	44 168,15	43 963,65
Biobrandstoffen	35 169,44	35 045,28
Elektrische motor	26 340,76	26 127,49
Hybride (zonder onderhoud)	27 941,43	27 845,02
Brandstofcellen	48 293,26	48 079,99
LPG	40 209,78	40 189,32
Brandstofcel hernieuwbaar	48 011,66	47 719,51
Elektrische motor (PM=132%)	26 435,00	26 221,73

Deze tabel geeft meteen een heel ander beeld. Door de hoge accijnzen op benzine en de subsidie voor alternatieven met een uitstoot minder dan 105 g/km, worden bijna alle alternatieven aantrekkelijk. Enkel de brandstofcelwagen en de waterstofverbrandingsmotor blijven duurder dan het benzinevoertuig. De waterstofverbrandingsmotor wordt wel bijna een rendabel alternatief, met een meerkost van minder dan 1 600 EUR over de totale levensduur op voorwaarde dat de waterstof aan 6 EUR/kg getankt kan worden. Wanneer men wil overstappen naar hernieuwbare bronnen voor de productie van waterstof is hier niet noodzakelijk aan voldaan, zeker niet met de huidige elektrolysemethoden. Om de waterstofverbrandingsmotor rendabel te maken is geen grote bijkomende subsidie vereist.

Het gebruik van brandstofcellen blijft duurder, maar zou toch tegen een niet erg grote meerkost kunnen gebeuren, zelfs met de huidige technieken. De kloof tussen de benzinewagen en de wagen op brandstofcellen wordt bijna gehalveerd wanneer er ook naar de belastingen wordt gekeken en bedraagt nog 5 713,26 EUR. Ook bij het gebruik van hernieuwbare bronnen voor de productie van waterstof is de meerkost niet erg groot, maar hier geldt wel dat de geproduceerde waterstof dan aan een kost van 6 EUR/kg beschikbaar moet zijn. Bovendien wordt er in de berekening verondersteld dat er 500 000 systemen per jaar worden geproduceerd. Deze meerkost zou eventueel ook gesubsidieerd kunnen worden, zeker wanneer er rekening gehouden wordt met het feit dat wanneer er meer brandstofcelssystemen geproduceerd worden, de kost ook zal dalen. Er kunnen misschien ook nog goedkopere opslagmethodes voor waterstof gevonden worden.

Dat bijna alle alternatieven rendabel worden wanneer de belastingen en accijnzen op de benzineauto's en brandstof in acht worden genomen, kan een verantwoording zijn om op deze alternatieve auto's geen verkeersbelasting en geen accijnzen op de brandstof te heffen. Behalve de subsidie op de aanschaf van een auto met een lage CO₂-emissie zijn er dan geen andere subsidies nodig. Enkel de brandstofcelauto's en de auto met een waterstofverbrandingsmotor kunnen misschien nog bijkomende subsidies gebruiken.

De verkeersbelasting is gelijk aan 207,96 EUR/jaar verhoogd met één opdeciem geheven door de gemeenten, wat in het totaal een jaarlijkse belasting van 228,756 EUR geeft. Wanneer de verkeersbelasting – zonder rekening te houden met inflatie – op benzine wel verdisconteerd wordt aan een intrestvoet van 4 %⁴³, wordt de netto contante waarde van de belasting over de hele levensduur gelijk aan 2 375,63 EUR en komt de totale kost van een benzinevoertuig op 41 981,80 EUR. De totale kost voor een LPG-voertuig met verdisconteerde verkeersbelasting en bijkomende belasting, die samen 3 466,06 EUR bedragen, is 39 337,01 EUR in het scenario met een schadekost van 9 EUR/ton CO₂. Dit verandert niets aan de algemene conclusies. De technologieën die rendabel zijn ten opzichte van de benzineauto's blijven dit ook in het nieuwe scenario. De brandstofcelauto's en de auto met waterstofverbrandingsmotor zijn niet rendabel ten opzichte van de benzineauto's. In het scenario met een schadekost van 20 EUR/ton CO₂ wordt de kost van het LPG-alternatief 39 316,55 EUR met verdiscontering van de belastingen aan 4 %, wat eveneens niets wijzigt aan de conclusies.

Op basis van tabel 18 en tabel 19 kan berekend worden hoeveel inkomsten de overheid misloopt doordat een weggebruiker een alternatief gebruikt in plaats van een benzineauto's. Hierdoor ontvangt de overheid geen accijns op de benzine, geen verkeersbelasting en geen belasting op invertering wanneer verondersteld wordt dat op de alternatieven geen belastingen geheven worden. Bovendien bestaat er een belastingvermindering voor alternatieven met een lage CO₂-uitstoot. Dit bedrag is een uitgave voor de overheid. De belastingvermindering bedraagt 4 270 EUR voor alle alternatieven behalve LPG, waarvoor er een vermindering van 800 EUR geldt. De berekening geeft de impliciete subsidie weer die momenteel bestaat voor de verschillende alternatieven. Wanneer daarnaast de vermeden emissie van CO₂ wordt weergegeven, die wordt uitgespaard door een alternatief te gebruiken en niet de benzineauto's, blijkt dat de kost voor de overheid per ton CO₂ veel hoger ligt dan de schadekost van 9 of 20 EUR/ton CO₂. Dit wordt getoond in tabel 20. Op LPG-voertuigen wordt de grootste impliciete subsidie gegeven. Daarna volgen voertuigen op aardgas, hybride auto's en voertuigen op biobrandstoffen.

⁴³ Volgens De Brabander (2005) wordt de discontovoet vastgesteld op 4 % wanneer men deze baseert op de lange termijnrente van een overheidsobligatie, die een zekere investering is. Deze discontovoet reflecteert de voorkeur om vandaag te consumeren in plaats van morgen.

**Tabel 20: Impliciete subsidies op de milieuvriendelijke alternatieven
(over de hele levensduur)**

Gebruikt alternatief	Impliciete subsidie* (EUR)	Vermeden CO₂-uitstoot (ton)	Kost/ton CO₂ (EUR/ton CO₂)
Aardgas	14 619,48	6,12	2 388,80
Waterstofverbrandingsmotor	14 619,48	18,59	786,42
Biobrandstoffen	14 619,48	11,29	1 294,91
Elektrische motor	14 619,48	19,39	753,97
Hybride	14 619,48	8,76	1 668,89
Brandstofcel	14 619,48	19,39	753,91
LPG	6 810,65	1,86	3 661,64
Brandstofcel hernieuwbaar	14 619,48	26,56	550,43

*Dit zijn de misgelopen inkomsten uit belasting op benzine verhoogd met de bestaande subsidie op het alternatief.

Hier dient opgemerkt te worden dat de uitstoot van CO₂ van het referentievoertuig lager ligt dan het gemiddelde verbruik van een benzinewagen met een verbruik van ongeveer 6 l/100 km (of 60 l/Mm) volgens Febiac (2007). De gemiddelde uitstoot bedraagt namelijk 144 g/km volgens deze laatste. Wanneer hierbij nog de Tank-to-Wheel-emissies van CO₂ geteld worden van het referentievoertuig, komen we op een Well-to-Wheels-waarde van 160,2 g/km. De vermeden externe kosten komen dan hoger te liggen. De berekening zonder en met belastingen kunnen dus opnieuw gemaakt worden ten opzichte van dit benzinevoertuig.

Wanneer in dit scenario opnieuw de impliciete subsidies worden berekend, zullen deze lager liggen dan in het vorige scenario omdat de hoeveelheid CO₂-emissies die vermeden worden in het scenario met een referentievoertuig met een CO₂-uitstoot van 160,2 g/km hoger liggen dan bij het referentievoertuig met een CO₂-emissie van 136,2 g/km. Dit neemt niet weg dat de impliciete subsidie voor bijvoorbeeld de waterstofverbrandingsmotor nog steeds 628,17 EUR/ton CO₂ bedraagt en voor de brandstofcel op waterstof die geproduceerd wordt met hernieuwbare bronnen 467,99 EUR, wat nog steeds erg hoog is in vergelijking met de schadekosten van 9 of 20 EUR/ton CO₂.

**Tabel 21: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven
(referentievoertuig met CO₂-uitstoot van 160,2 g/km)**

Technologie	Kosten exclusief belastingen – vermeden externe kost (EUR) (9 EUR/ton CO₂)	Kosten inclusief belastingen– vermeden externe kost (EUR) (9 EUR/ton CO₂)
Benzine	32 230,52	42 580,00
Aardgas	38 352,64	34 082,64
Waterstofverbrandingsmotor	48 396,02	44 126,02
Biobrandstoffen	39 397,36	35 127,36
Elektrische motor	30 568,76	26 298,76
Hybride (zonder onderhoud)	27 318,45	27 907,85
Brandstofcellen	52 521,26	48 251,26
LPG	36 628,92	40 167,75
Brandstofcel hernieuwbaar	52 239,54	47 969,54
Elektrische motor (PM=132%)	30 663,00	26 393,00

Ook hier geldt de opmerking dat wanneer de verkeersbelasting op benzine wel verdisconteerd wordt aan 4 % in het scenario met belastingen en accijnzen, er niets aan de conclusies verandert. De brandstofcel en de waterstofverbrandingsmotor blijven niet rendabel ten opzichte van de benzinewagen. De totale kost van de LPG-wagen komt dan op 39 294,98 EUR, maar de relatieve rangschikking van hoge naar lage kost blijft hetzelfde.

In alle bovenstaande berekeningen werd bij de brandstofcelwagen en de auto met een waterstofverbrandingsmotor een kost voor waterstofopslag gehanteerd voor de opslag van 9 kg waterstof. Omdat volgens DaimlerChrysler de mogelijkheid is aangetoond om 100 km af te leggen met 1 kg waterstof, is er om dezelfde autonomie als een benzinewagen te hebben ongeveer 5 kg waterstof nodig. Bovendien wordt de brandstofcel nog ondersteund door een batterij van 6 kWh. De kost van de opslagtanks bij de brandstofcel en de waterstofverbrandingsmotor vermindert dan van 10 350 EUR naar 5 750 EUR. Hierdoor wordt de kloof tussen de benzine en de brandstofcelwagen respectievelijk de wagen met een waterstofverbrandingsmotor verkleind. In tabel 18 zonder belastingen en met een schadekost van 9 EUR/ton CO₂ wordt de meerkost van een brandstofcelvoertuig ten opzichte van de benzinewagen 15 732,74 EUR, die van de waterstofverbrandingsmotor 11 607,63 EUR. Voor tabel 19 wordt de kost van de brandstofcelauto nog slechts 1 113,26 EUR hoger dan die van de benzinewagen en de waterstofverbrandingsmotor wordt 3 011, 85 goedkoper dan de benzinereferentie. Zo wordt de waterstofverbrandingsmotor wel aantrekkelijk.

5.2 Goedkoop is niet noodzakelijk milieuvriendelijk

De goedkoopste technologie – zonder rekening te houden met belastingen of subsidies, dus gebaseerd op tabel 18 – is de elektrische wagen, tenzij het onderhoud van de hybride wagen over de hele levensduur, zijnde 13 jaar in de berekeningen, goedkoper is dan 3 250,31 EUR. Maar aangenomen wordt dat de hybride voertuigen wegens hun complexiteit even veel of zelfs meer onderhoud vereisen dan een benzinewagen. De elektrische wagen is ook zeer milieuvriendelijk en wanneer er hernieuwbare bronnen voor de elektriciteitsproductie gebruikt worden is er zelfs geen uitstoot van vervuilende stoffen. Nadelig aan dit alternatief is de zeer beperkte actieradius. De volgende technologie naar stijgende prijzen is de hybride wagen, zolang het onderhoud over de hele levensduur niet meer kost dan 9 193,92 EUR. Indien het onderhoud duurder is dan deze kost, is de LPG het tweede goedkoopste alternatief. Na de LPG-wagen komen in volgorde: de wagen op aardgas, op biobrandstoffen en de waterstofverbrandingsmotor. De brandstofcel is de duurste technologie.

Wanneer er gekeken wordt naar de milieuvriendelijkheid van de verschillende alternatieven verandert de rangschikking. De vermeden externe milieukosten werden opgenomen in tabel 22. De elektrische wagen en de brandstofcel zijn het milieuvriendelijkst, zelfs wanneer de huidige productiemix van elektriciteit in België wordt beschouwd. Een wagen, aangedreven door aardgas, heeft momenteel nog een grotere vermeden externe milieukost dan een auto met een waterstofverbrandingsmotor wanneer er gerekend wordt met een schadekost van 9 EUR/ton CO₂. Wanneer er gerekend wordt met een schadekost van 20 EUR/ton CO₂ is de waterstofverbrandingsmotor voordeliger wat de externe milieukosten betreft. Dit toont de impact van de waardering van de schadekost van een ton CO₂ aan. Bij de beoordeling van de milieuvriendelijkheid van aardgas werd er geen rekening gehouden met de relatief grote uitstoot van methaan. Dit moet echter in het achterhoofd gehouden worden. Daarna volgen de hybride wagen en het alternatief LPG. Het gebruik van biobrandstoffen zorgt voor de kleinste vermindering van externe milieukosten in vergelijking met benzine. De meest milieuvriendelijke technologie verdient eigenlijk de hoogste subsidies. Dit indachtig zouden de brandstofcellen en de elektrische wagen de hoogste subsidies verdienen. De hoge kosten van de brandstofcelwagens zouden op die manier verminderd kunnen worden voor de gebruiker en de subsidies voor de elektrische wagen kunnen misschien beter gebruikt worden om het onderzoek naar grotere batterijcapaciteiten te ondersteunen. Zo kan de autonomie van de elektrische wagen vergroot worden. Vermits de LPG-wagen beter is voor het milieu dan de benzineauto, wat bijgestaan wordt door de berekening van de vermeden externe milieukosten, is het onlogisch vanuit dit oogpunt om jaarlijks een bijkomende belasting te heffen op LPG. Dit is misschien een punt uit het huidige beleid dat herbekeken moet worden. De hoogte van de subsidies zou dan minstens gelijk moeten zijn aan de vermeden externe milieukost om op die manier de niet-vervuiler te belonen. In tabellen 25, 26 en 27 wordt er een

gedifferentieerde belastingvermindering uitgewerkt op basis van de totale milieu-impact. Tabellen 23 en 24 trachten de bestaande belastingvermindering op basis van CO₂-uitstoot te differentiëren.

Tabel 22: Vermeden externe milieukosten

Technologie	Vermeden externe kost (EUR) (9 EUR/ton CO₂)	Vermeden externe kost (EUR) (20 EUR/ton CO₂)
Benzine	0,00	0,00
Aardgas	555,84	623,03
Waterstofverbrandingsmotor*	486,85	691,35
Biobrandstoffen	98,06	222,22
Elektrische motor*	785,74	999,01
Hybride	375,17	471,58
Brandstofcellen*	785,74	999,01
LPG	332,05	352,50
Brandstofcel hernieuwbaar	1 067,34	1 359,49
Elektrische motor (PM=132 %)	691,50	904,77

* Er wordt rekening gehouden met de uitstoot die veroorzaakt wordt bij de productie van de elektriciteit. Wanneer de productie van elektriciteit met wind- of zonne-energie zou gebeuren zouden de emissies lager liggen en de vermeden externe kosten bijgevolg hoger, zoals berekend bij "brandstofcel hernieuwbaar". De vermeden externe milieukosten van de wagen met een waterstofverbrandingsmotor zou nog iets lager liggen doordat deze nog kleine hoeveelheden CO, NO_x en NMVOS zou uitstoten.

In 2006 werden in België 530 296 nieuwe personenwagens ingeschreven. (Federale Overheidsdienst Economie, 2007) Het totale aantal personenwagens was 4 976 286 auto's. Wanneer er wordt aangenomen dat er 100 000 wagens van een bepaalde technologie zouden komen, is dit dus slechts 19 % van het aantal wagens dat in één jaar wordt ingeschreven. De extra infrastructuur- kost die nodig is voor een nieuwe alternatieve techniek kan dan gebruikt worden door 100 000 wagens. Hierbij wordt nog abstractie gemaakt van zwaardere voertuigen die ook gebruik zouden kunnen maken van de nieuwe infrastructuur. Zo worden de nieuwe installaties relatief gezien niet zo duur. Een investering voor de uitbouw van een beperkt aardgasnetwerk, betekent per wagen gezien slechts een veel kleinere meerkost. Het netwerk kan dan ook nog eens vele jaren gebruikt worden. Bovendien was voor het aanleggen van het reusachtige benzinenetwerk ook een enorme investering nodig. Alle investeringen moeten dus in het juiste perspectief gezien worden.

5.3 De belastingvermindering op lage CO₂-uitstoot nader bekeken

Op wagens met een CO₂-uitstoot lager dan 105 g/km wordt er een belastingvermindering toegekend van 15 % op de aankoop van het voertuig met een voor inkomstenjaar 2007

geïndexeerd maximum van 4 270 EUR. Alle alternatieven behalve LPG vallen in deze categorie. Deze alternatieven hebben echter niet allemaal dezelfde CO₂-emissies, dus de belastingvermindering kan beter gedifferentieerd worden. Op basis van tabel 15 zouden brandstofcellen, elektrische wagens en de waterstofverbrandingsmotor een hogere subsidie verdienen dan hybride wagens en aardgasvoertuigen. De vermindering van maximaal 4 270 EUR kan bijvoorbeeld evenredig verhoogd worden naargelang de uitstoot verder onder 105 g/km CO₂ daalt.

Tabel 23: Gedifferentieerde belastingvermindering

Alternatief	Gemiddelde uitstoot van CO₂ (g/km)	% ten opzichte van aardgas	Verhogings-coëfficiënt	Belastingvermindering
Aardgas	104,87	100	1	4 270
Waterstofverbrandingsmotor	40,86	39	1,61	6 874,7
Biobrandstof	78,315	74,7	1,253	5 350,31
Elektrisch	36,77	35	1,65	7 045,5
Hybride	91,25	87	1,13	4 825,1
Brandstofcel	36,77	35	1,65	7 045,5
Brandstofcel hernieuwbaar	0	0	2	8 540

Op basis van deze gedifferentieerde belastingvermindering kan tabel 19 herwerkt worden. Hieruit ontstaat tabel 24. Met deze gedifferentieerde vermindering wordt de waterstofverbrandingsmotor rendabel ten opzichte van de benzinewagen. Verder blijven dezelfde alternatieven rendabel ten opzichte van benzine als bij de gewone belastingvermindering, maar worden sommige alternatieven nog goedkoper. De gedifferentieerde belastingvermindering is wel eerlijker omdat ze de niet-vervuiler of de minder-vervuiler belooft ten opzichte van de autogebruiker die in vervuilende wagens rijdt. De kloof tussen de brandstofcel en de benzinewagen wordt in dit scenario wel erg klein. Er zijn dus zelfs bijna geen bijkomende subsidies vereist om het gebruik van deze wagens aan te moedigen. Hier werd er nog geen rekening mee gehouden dat de gebruikte kost voor de brandstoftank waarschijnlijk te hoog is, zodat de brandstofcelwagen zelfs een rendabel alternatief kan worden. Bij een brandstoftankkost van 5 750 EUR in plaats van 10 350 EUR, is de brandstofcelwagen zelfs 1 662,4 EUR goedkoper dan de benzinewagen inclusief belastingen en accijnzen, rekenend met een schadekost van 9 EUR/ ton CO₂. De assumptie dat er 500 000 brandstofcelsystemen per jaar moeten geproduceerd worden, blijft in alle berekeningen gelden.

De brandstofcelwagen die gebruik maakt van waterstof die geproduceerd wordt via hernieuwbare bronnen is dan in het scenario met een schadekost van 20 EUR/ton CO₂ en een goedkopere brandstoftank zelfs 3 730,49 EUR goedkoper dan de benzinewagen inclusief accijnzen en

belastingen. De hoge subsidie van 8 540 EUR op aankoop kan dan bijvoorbeeld verlaagd worden met 3 730,49 EUR waarbij dit geld (wat per wagen al heel wat meer wordt als er bijvoorbeeld 100 000 wagens per jaar op de markt worden gebracht) kan gebruikt worden voor het ondersteunen van verder onderzoek naar elektrolyse en het subsidiëren van elektrolyse met behulp van wind- of zonne-energie zodat deze productiemethode op termijn goedkoper wordt. Ook verder onderzoek en verdere ontwikkeling voor de opslag van waterstof kunnen door subsidies ondersteund worden.

In sommige gevallen is een dergelijke hoge subsidie niet nodig om de kosten van het alternatief te verlagen voor de weggebruiker omdat het alternatief op zich al rendabel is ten opzichte van de benzinewagen, zoals de elektrische wagen. De subsidie kan dan bijvoorbeeld wel gebruikt worden om de niet gekwantificeerde meerkost van een zeer beperkte autonomie op te vangen. De beperkte autonomie kan dan met behulp van de subsidies vergoed worden aan de weggebruiker. De huidige productiekost van de elektrische wagen ligt nog hoger dan de berekende door de zeer beperkte productie.

Ook hier verandert verdiscontering van de belastingen niets aan de relatieve rangschikking van de technologieën. De kost van de LPG-wagen wordt 39 337,01 EUR in het scenario met 9 EUR/ton CO₂, waardoor hij goedkoper blijft dan de waterstofverbrandingsmotor. De benzinewagen met een kost van 41 981,80 EUR blijft de duurste technologie op de brandstofcel na. In het scenario met een schadekost van 20 EUR/ton CO₂, waar de totale kost van het LPG-alternatief 39 337,01 EUR bedraagt, blijft de conclusie eveneens hetzelfde.

Tabel 24: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (inclusief belastingen met gedifferentieerde belastingvermindering)

Technologie	Kosten – vermeden externe kost (EUR) (9 EUR/ton CO₂)	Kosten – vermeden externe kost (EUR) (20 EUR/ton CO₂)
Benzine	42 580,00	42 580,00
Aardgas	34 124,66	34 057,47
Waterstofverbrandingsmotor	41 563,45	41 358,95
Biobrandstoffen	34 089,13	33 964,97
Elektrische motor	23 565,26	23 351,99
Hybride (zonder onderhoud)	27 386,33	27 289,92
Brandstofcellen	45 517,76	45 304,49
LPG	40 209,78	40 189,32
Brandstofcel hernieuwbaar	43 741,66	43 449,51
Elektrische motor (PM=132%)	23 659,50	23 446,23

Er kan ook een gedifferentieerde belastingvermindering berekend worden, op basis van de totale vermeden milieuschade in plaats van enkel op basis van de vermindering van de CO₂-uitstoot. Dit wordt in de tabellen 25, 26 en 27 weergegeven. Voor aardgas wordt een belastingvermindering genomen van 4 270 EUR, die dan verlaagd of verhoogd wordt evenredig met de vermeden externe milieukosten van het alternatief in vergelijking met de vermeden externe milieukosten van aardgas. Dit lijkt een redelijke veronderstelling omdat zo de belastingvermindering op een gemiddelde aardgaswagen, die een uitstoot van 104,87 g CO₂/km zou hebben, hetzelfde blijft. Dit is echter een arbitraire beslissing, er kan eveneens een andere belastingvermindering als uitgangspunt worden genomen, of een andere technologie. De onderstaande berekening wil gewoon het principe aantonen.

**Tabel 25: Gedifferentieerde belastingvermindering op basis van alle pollutanten
(9 EUR/ton CO₂)**

Alternatief	Gemiddelde Vermeden externe milieukost (EUR)	% ten opzichte van aardgas	Coëfficiënt	Belastingvermindering
Aardgas	555,84	100	1	4 270
Waterstofverbrandingsmotor	486,85	87,6	0,876	3 740,52
Biobrandstoffen	98,06	17,6	0,176	751,52
Elektrische motor	785,74	141,4	1,414	6 037,78
Hybride	375,17	0,675	0,675	2 882,25
Brandstofcellen	785,74	141,4	1,414	6 037,78
LPG	332,05	59,7	0,597	2 549,19
Brandstofcel hernieuwbaar	1 067,34	192	1,92	8 198,4
Elektrische motor (PM 132%)	691,50	124,4	1,244	5 311,88

Tabel 26: Gedifferentieerde belastingvermindering op basis van alle polluenten (20 EUR/ton CO₂)

Alternatief	Gemiddelde Vermeden externe milieukost (EUR)	% ten opzichte van aardgas	Coëfficiënt	Belastingvermindering
Aardgas	623,03	100	1	4 270
Waterstofverbrandingsmotor	691,35	111	1,11	4 739,7
Biobrandstoffen	222,22	35,7	0,357	1 524,39
Elektrische motor	999,01	160,3	1,603	6 844,81
Hybride	471,58	75,7	0,757	3 232,39
Brandstofcellen	999,01	160,3	1,603	6 844,81
LPG	352,50	56,6	0,566	2 416,82
Brandstofcel hernieuwbaar	1 359,49	218,2	2,182	9 317,14
Elektrische motor (PM=132 %)	904,77	145,2	1,452	6 200,04

Bij de berekening van de totale kost werd de vermeden externe kost weggelaten, omdat deze al in de subsidie in rekening werd gebracht.

Tabel 27: Vergelijking van de kosten van de verschillende alternatieven (inclusief belastingen met gedifferentieerde belastingvermindering op basis van alle polluenten)

Technologie	Kosten (EUR) (9 EUR/ton CO₂)	Kosten (EUR) (20 EUR/ton CO₂)
Benzine	42 580,00	42 580,00
Aardgas	34 680,50	34 680,50
Waterstofverbrandingsmotor	45 184,48	44 185,30
Biobrandstoffen	38 785,98	38 013,11
Elektrische motor	25 358,72	24 551,69
Hybride (zonder onderhoud)	29 704,35	29 354,21
Brandstofcellen	47 311,22	46 504,19
LPG	38 792,64	38 925,01
Brandstofcel hernieuwbaar	45 150,60	44 031,86
Elektrische motor (PM=132%)	26 084,62	25 196,46

Er kan bemerkt worden dat LPG het enige alternatief is waarvoor de kosten toenemen door een hogere schadekost voor CO₂ te hanteren. De verklaring is dat de CO₂-vermindering bij aardgas veel hoger ligt dan bij LPG. Door een hogere schadekost te gebruiken, krijgt aardgas relatief een

grotere verhoging van de vermeden externe kosten dan LPG. Hierdoor wordt de gedifferentieerde belastingvermindering voor LPG kleiner. In beide schadekostenscenario's zijn de waterstofverbrandingsmotor en de brandstofcellen niet rendabel ten opzichte van de benzinewagen. Alle andere technologieën wel. In het tweede scenario is de brandstofcelwagen niet rendabel, maar nog minder dan 4 000 EUR duurder dan de benzinewagen. Indien de kost van de brandstoftank 5 750 EUR in plaats van 10 350 EUR wordt, is de brandstofcelwagen goedkoper dan benzinewagen. De wagen met de waterstofverbrandingsmotor zou bij een schadekost van 20 EUR/ton CO₂ en een verlaagde kost voor de brandstoftank 2 994,70 EUR goedkoper dan de benzinewagen zijn. Indien de belasting wel verdisconteerd wordt, wordt de totale kost van de LPG-wagen 37 919,87 EUR met een schadekost van 9 EUR/ton CO₂ en 38 052,24 EUR in het scenario met een schadekost van 20 EUR/ton CO₂. Verdiscontering van de onderhoudskosten verandert niets aan de relatieve rangschikking, alle technologieën worden gewoon goedkoper.

5.4 Introductie alternatieven

In deze paragraaf wordt berekend hoeveel van de vereiste CO₂-daling er kan bewerkstelligd worden door er elk jaar voor te zorgen dat de alternatieven een bepaald aandeel van de nieuwe wagens innemen. Dit wordt voor elk alternatief afzonderlijk berekend.

In 2004 werden er in België 147,9 Mton CO₂-equivalenten uitgestoten. Volgens de lineaire lijn van 1990 naar de Kyoto-doelstelling in 2012, zou België daarmee 5,9 % teveel hebben uitgestoten. (Klimaat.be, 2007) Bijgevolg mocht België 139,66 Mton uitstoten. De emissies moesten in 2004 dus nog 8,24 Mton lager liggen. Omdat dit de recentste volledige gegevens zijn die voor België konden gevonden worden, worden deze gebruikt in de berekening. Verondersteld wordt dat de Belgische CO₂-emissies in 2007 eveneens 8,24 Mton verminderd moeten worden. Er wordt dan gekeken hoe groot de daling van de broeikasgasemissies is door respectievelijk 1 %, 5 % of 10 % van de nieuwe voertuigen, die op een jaar geregistreerd worden, te vervangen door een bepaald alternatief. Dit wordt in de kolom "absoluut" weergegeven. In de kolom "relatief" wordt berekend hoe groot deze verlaging is ten opzichte van de totale daling van 8,24 Mton CO₂-equivalenten. De vermindering wordt berekend door de CO₂-emissies/km die vermeden worden door het alternatief te gebruiken in plaats van de benzinewagen, te vermenigvuldigen met 15 000 km, om zo de totale vermeden uitstoot op jaarbasis te bekomen per wagen. Dit bedrag wordt dan vermenigvuldigd met respectievelijk 5 302,96; 26 514,8 en 53 029,6 wagens om een aandeel van 1 %, 5 % en 10 % van het aantal nieuwe wagens op jaarbasis in te calculeren (in 2006 was het aantal nieuwe wagens namelijk 530 296). De volgende tabel geeft de getallen weer.

Tabel 28: Bespaarde CO₂-uitstoot door gebruik alternatieven

Technologie	1 %		5 %		10 %	
	Bespaarde CO ₂ -uitstoot (kton)		Bespaarde CO ₂ -uitstoot (kton)		Bespaarde CO ₂ -uitstoot (kton)	
	Absoluut	Relatief*(%)	Absoluut	Relatief*(%)	Absoluut	Relatief*(%)
Aardgas	2,49	0,0302	12,46	0,15	24,91	0,30
Waterstofverbrandingsmotor	7,58	0,092	37,92	0,46	75,84	0,92
Biobrandstoffen	4,60	0,06	23,02	0,28	46,04	0,56
Elektrische motor	7,91	0,096	39,54	0,48	79,09	0,96
Hybride	3,58	0,043	17,88	0,22	35,75	0,43
Brandstofcel	7,91	0,096	23,02	0,48	46,04	0,96
LPG	0,76	0,0092	3,79	0,046	7,58	0,092
Brandstofcel hernieuwbaar	10,83	0,13	54,17	0,66	108,34	1,31

* In het scenario "relatief" wordt berekend hoeveel de bespaarde CO₂-uitstoot bijdraagt tot de besparing die moet geleverd worden voor het Kyoto-protocol, namelijk 8,24 Mton.

Er kan opgemerkt worden dat door de alternatieven 10 % van de nieuwe voertuigen op een jaar te laten innemen, er ongeveer 1 % van de benodigde CO₂-vermindering kan gehaald worden met de waterstofverbrandingsmotor, het batterij-elektrisch voertuig en de brandstofcel. Wanneer de elektriciteit geproduceerd wordt met behulp van hernieuwbare bronnen, wordt er zelfs 1,3 % van de benodigde daling van 8,24 Mton bereikt. De andere alternatieven bieden minder mogelijkheden tot CO₂-reductie. Hierbij wordt er nog geen rekening gehouden met het feit dat deze nieuwe wagens waarschijnlijk oudere, en dus meer vervuilende wagens zullen vervangen, waardoor er nog een bijkomende emissiedaling plaatsvindt. Bovendien kan er misschien ook nog een groter aandeel alternatieve vormen op de markt gebracht worden, of ook bij het vrachtvervoer een vervanging met milieuvriendelijkere alternatieven bewerkstelligd worden, waardoor de broeikasgasuitstoot nog zal dalen.

5.5 Omgekeerde berekening

Hieronder wordt er een omgekeerde berekening gemaakt en er van uitgegaan dat het niet bekend is hoeveel de waterstofproductie zal kosten wanneer deze gebeurt via elektrolyse van hernieuwbare energiebronnen. Dan zal er geen uitstoot van schadelijke stoffen zijn en wordt er volgens de berekening 1 067,34 EUR aan externe kosten bespaard over de totale levensduur van de wagen door een brandstofcelwagen te gebruiken in plaats van een Euro 4-benzinewagen. Bovendien wordt een brandstofkost van 16 263,18 EUR bespaard over de levensduur van 13 jaar.

Dan zou de brandstofcelwagen, zonder rekening te houden met belastingen of subsidies maar wel met de brandstofaccijnzen, 17 330,52 EUR mogen kosten voor de wagen zelf en het gebruikte waterstof. Wanneer de berekende kost van 66 EUR/kW beschouwd wordt die volgens Carlson et al. (2005) kan bereikt worden wanneer er 500 000 brandstofcellen systemen per jaar worden geproduceerd, komt men op een meerkost van 5 280 EUR voor het hele systeem van 80 kW.

USDOE (2007) wil een opslagkost voor waterstof bereiken van 4 USD/kWh of 1,11 USD/MJ. Aangezien waterstof een energie-inhoud heeft van 120 MJ/kg komt dit neer op een kost van 133,2 USD/kg. Momenteel echter kosten volgens figuur 10 op pagina 89 de goedkoopste opslagtechnieken nog rond 7 USD/kWh. Dit komt overeen met een kost van 1,94 USD/MJ en dus met 233,33 USD/kg waterstof of ongeveer 171 EUR/kg. Aangezien het volgens DaimlerChrysler (2007) mogelijk is om met 1 kg waterstof 100 km af te leggen, is er om ongeveer een zelfde autonomie te hebben als een benzinewagen – die ongeveer 500 km bedraagt volgens VUB, VITO en CEES (2005) – 5 kg waterstof nodig. Dit komt neer op een opslagkost van 855 EUR.

De totale meerkost voor een brandstofcelwagen ten opzichte van een benzinewagen wordt volgens de berekeningen dan 6 135 EUR. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de brandstoftank voor waterstof, die waarschijnlijk ook duurder zal uitvallen dan voor benzine. Wanneer dit bedrag afgetrokken wordt van de bespaarde brandstof en vermeden milieuschade, blijft er nog 11 195,52 EUR over voor de productie van waterstof, wat overeen komt met een kost van 5,74 EUR/kg waterstof. Dit wordt momenteel nog niet gehaald. Wanneer er geen rekening gehouden wordt met de accijnzen op benzine, wordt het bedrag dat aan de getankte waterstof kan besteed worden nog kleiner. Maar dit is misschien een argument om subsidies voor de productie van waterstof via elektrolyse te verantwoorden. Zo kan de prijs aan de pomp op 5,74 EUR/kg gehouden worden. In voorgaande paragraaf bleek al dat in geval van een gedifferentieerde belastingvermindering er zeker nog ruimte is voor subsidies voor elektrolyse.

Tabel 29: Schematische weergave van de berekeningen (bedragen in EUR)

Uitgespaarde externe milieukosten*	1 067,34
Bespaarde benzine (inclusief accijnzen)	16 263,18
TOTAAL	17 330,52
Meerkost systeem 80 kW	5 280,00
Opslagkost waterstof	855,00
TOTALE MEERKOST	6 135,00
Nog over voor waterstofproductie	11 195,52
Omgerekend per kg waterstof: wat de gebruiker aan de pomp wil betalen	5,74

*Deze milieukosten worden uitgespaard door een brandstofcelwagen te gebruiken in plaats van een benzinewagen en worden berekend over de totale levensduur van de wagen die op 13 jaar wordt genomen wanneer er 15 000 km/jaar wordt gereden.

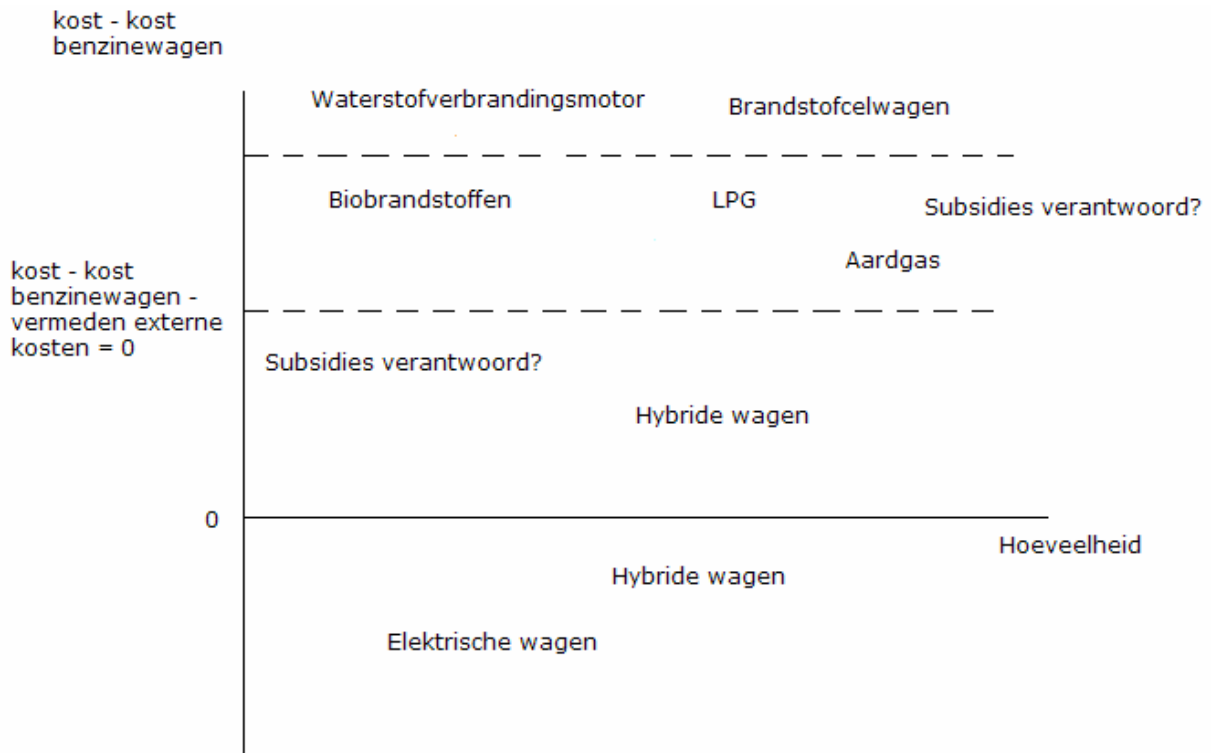
6 BESLUIT

Om een oplossing te bieden aan de opwarming van de aarde werd het Kyoto-protocol ondertekend. Dit is op zich niet voldoende, ook na 2012 zullen nog inspanningen moeten ondernomen worden. Hoewel het Protocol nog verschillende schoonheidsfoutjes en onvolkomenheden vertoont, zet het een belangrijke stap voorwaarts voor internationale milieuakkoorden. Om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen zullen inspanningen moeten gebeuren in verschillende sectoren. In deze eindverhandeling werd de transportsector en in het bijzonder het personenvervoer voor auto's belicht. De overgang naar milieuvriendelijke alternatieven in de vervoersector wordt ook ingegeven door de grote afhankelijkheid van olie die geleverd wordt door een beperkt aantal, vaak politiek instabiele, landen. Welke alternatieve technologieën er in de toekomst een plaats zullen veroveren op de weg is sterk afhankelijk van de evoluties die zullen plaatsvinden bij de verbeteringen van de verschillende technologieën. Ook zijn sommige alternatieven, zoals de brandstofcel, nu gewoon nog te duur. Wanneer er echter naar de berekeningen in hoofdstuk 5 wordt gekeken, blijkt dat er toch nog veel ruimte is voor belasting- en subsidiemaatregelen om bepaalde technologieën te ondersteunen en hen zo op termijn goedkoper te maken doordat ze veel gebruikt worden. Ook al zijn vele technologieën nog niet rendabel ten opzichte van de benzinewagen, ze kunnen het snel worden wanneer er ook rekening wordt gehouden met de hoge belastingen die momenteel op de benzinewagen worden geheven. Wanneer de subsidies op aankoop van een voertuig met een lage CO₂-uitstoot worden gedifferentieerd naargelang de hoogte van de uitstoot, wordt zelfs het brandstofcelvoertuig bijna rendabel. Hetzelfde geldt voor de gedifferentieerde belastingvermindering op basis van de vermeden externe milieukosten.

In figuur 18 worden de verschillende technologieën geplaatst in categorieën op basis van figuur 3 uit het begin van de eindverhandeling. Het maakt niet uit of dit gebeurt gebaseerd op de schadekost van 9 EUR/ton CO₂ of op basis van 20 EUR/ton CO₂, want de indeling blijft hetzelfde. Ook in het scenario met een referentievoertuig met een emissie van 160,2 g CO₂/km vallen de alternatieven in dezelfde categorieën op de figuur.

Bij de gedifferentieerde belastingvermindering op basis van de vermeden externe milieukosten blijven alle technologieën eveneens in dezelfde categorie. Wanneer er een gedifferentieerde belastingvermindering wordt gebruikt op basis van de CO₂-uitstoot worden alle alternatieven behalve de brandstofcel rendabel ten opzichte van de benzinewagen wanneer er rekening gehouden wordt met belastingen en accijnzen. Enkel de waterstofverbrandingsmotor verandert dus in de indeling, alle andere alternatieven blijven in dezelfde categorie, maar worden wel goedkoper door de belastingvermindering. Wanneer de kost van de waterstof tank van de brandstofcelwagen en van het voertuig met een waterstofverbrandingsmotor te hoog werd geschat, kan de brandstofcelwagen zelfs goedkoper worden dan de benzinewagen in beide schadekostenscenario's

bij de gedifferentieerde belastingvermindering op basis van de CO₂-uitstoot en in het scenario met een schadekost van 20 EUR/ton CO₂ met een gedifferentieerde belastingvermindering op basis van de vermeden externe milieukosten. In het scenario met een schadekost van 9 EUR/ton CO₂ is de wagen slechts 131,22 EUR duurder dan de benzinereferentie. De waterstofverbrandingsmotor wordt rendabel in beide scenario's bij de gedifferentieerde belastingvermindering op basis van alle polluenten.



Figuur 18: Besluit

In de overzichtstabel worden de relatieve kwalitatieve en kwantitatieve scores op basis van hoofdstuk 4 en hoofdstuk 5 van de verschillende alternatieve technologieën en de benzinereferentie nog eens samengevat. Hoe beter de relatieve score, hoe meer ☺ -tekens de technologie krijgt toegewezen. Voor een pollutant betekent dit dus een lage uitstoot, voor de autonomie een hoge autonomie. Naarmate de score slechter is, krijgt de technologie meer ☹ -tekens. Een neutrale score wordt ☹. De scores mogen enkel horizontaal vergeleken worden. Verticale vergelijking heeft geen betekenis.

Tabel 30: Overzichtstabel

Criterion	Benzine	Aardgas	Bio- brandstof	Waterstof- Verbrandingsmotor	Elektrische Wagen	Hybride	LPG	Brandstofcel	Brandstofcel hernieuwbaar
CO ₂ *	☹☹	☺	☺☹	☺☺	☺☺	☺	☹	☺☺	☺☺☺
CO	☹	☺	☺	☺	☺☺	☺	☺	☺☺	☺☺
NO _x	☺	☺☺	☺	☹☹	☺☺	☺☺	☺	☺☺	☺☺☺
SO ₂	☹	☺☺☺	☹	☺☺	☺☺	☺	☺	☺☺	☺☺☺
PM	☺	☺☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺☺☺
NMVOS	☹	☺☺	☺	☺☺☺	☺☺☺	☺	☺	☺☺☺	☺☺☺
geluidshinder	☹	☹	☹	☹	☺	☹	☹	☺	☺
Kost exclusief belasting	☺	☺	☺	☹	☺☺	☺	☺	☹☹☹	☹☹☹
Kost inclusief belasting	☺	☺	☺	☺	☺☺	☺☺	☺	☹☹	☹☹
Efficiëntie	☺	☺	☺	☺	☺☺☺	☺	☺	☺☺	☺☺
Autonomie**	☺	☹	☺	☺	☹☹	☺	☺	☺	☺
Kofferruimte***	☺	☹	☺	☹	☹☹	☺	☹	☺	☺
Infrastructuur	☺☺	☺	☺	☹☹	☹	☺☺	☺	☹☹	☹☹
Brandstof Productiekost	☺	☺	☹	☹☹	☺	☺	☺☺	☹☹	☹☹☹
Afhankelijkheid Fossiele brandstoffen	☹	☹	☺	☺	☺	☹	☹	☺	☺

* Biobrandstoffen kunnen voor een daling van de CO₂-uitstoot zorgen, maar hun impact is wel afhankelijk van wat er met de nevenproducten gebeurt zoals vermeld in hoofdstuk 4.

** De autonomie van de brandstofcelwagen en de waterstofverbrandingsmotor is afhankelijk van de grootte van de tank. Bij de in de berekeningen gebruikte 9 kg is er een grote autonomie (tot 900 km).

*** Gasvormige brandstoffen hebben een grotere opslagtank nodig. Bovendien mag de tank bij LPG en aardgas maar maximaal voor 80 % gevuld zijn uit veiligheidsoverwegingen. Een brandstofcel is efficiënter dan een waterstofverbrandingsmotor waardoor de brandstoftank kleiner kan zijn.

Verder onderzoek naar opslagtechnieken voor waterstof, distributietechnologieën, studies over de kosten van de uitbouw van een tankinfrastructuur voor waterstof en ontwikkeling van veel performantere batterijen kunnen de voor- en nadelen van de verschillende technologieën in een ander daglicht stellen. Welke de aandrijfvorm van de toekomst wordt, blijft voorlopig moeilijk te voorspellen. Betere inschattingen van de schadekosten van de verschillende polluenten, zoals PM, VOC, CO en SO₂ kunnen tot betere berekeningen leiden van de externe milieukosten. Hetzelfde geldt voor de schadekost per ton CO₂. Ook hierover is nog meer zekerheid gewenst. Op die manier kan de kwantitatieve vergelijking van de verschillende technologieën met meer zekerheid gebeuren. Er kan een transactiekostenanalyse uitgevoerd worden van de gedifferentieerde belastingverminderingen. Misschien liggen de kosten van invoering van een dergelijke maatregel veel te hoog.

Voor de overheid is de subsidiëring van milieuvriendelijke alternatieven en de vervanging van benzinewagens erdoor een grote kost. Ze loopt namelijk zeer veel taksen mis en een subsidie betekent een uitgave voor de overheid. In tabel 20 wordt getoond dat de inkomsten van de overheid zeer sterk dalen wanneer een weggebruiker een alternatief dat niet belast is gaat gebruiken. Wanneer deze subsidie afgewenteld wordt op de burger via andere belastingverhogingen, kan het voor de burger ook een zeer negatieve maatregel worden om de alternatieven te subsidiëren. Zoals vermeld in hoofdstuk 2 impliceren subsidies – omdat ze gefinancierd moeten worden – bijkomende welvaartskosten en dus een welvaartsverlies. Als de subsidie niet wordt gecompenseerd door belastingen, zullen de overheidsinkomsten – en bijgevolg het overheidsbudget – dalen en er dus besparingen moeten gebeuren. (Van Herbruggen en Proost, 2002) Er moet dan gesnoeid worden in de overheids gelden op andere gebieden, waardoor er een welvaartsverlies optreedt. Hogere belastingen leiden eveneens tot een welvaartsverlies. Hogere belastingen kunnen ook leiden tot een herverdeling van rijk naar arm. De subsidies zijn na verloop van tijd misschien niet meer nodig, omdat de technologieën wanneer ze meer geproduceerd en gebruikt worden, vanzelf goedkoper zullen worden.

Behalve via belastingen, subsidies, normeren en rantsoeneren kan de overheid, zoals in hoofdstuk 2 vermeld, ook een rol spelen op het vlak van informatieverspreiding. Zo zou de overheid bijvoorbeeld kunnen instaan voor het bewust maken van de bevolking dat de batterij-elektrische wagen en de hybride wagen rendabele alternatieven zijn in vergelijking met de benzinewagen. De overheid zou dan kunnen zorgen voor de marketing van deze alternatieven om de bevolking aan te zetten tot het gebruik ervan.

LIJST VAN GERAADPLEEGDE WERKEN

Boeken, rapporten, artikels

Barendrecht, E., Barten, H en de Vaal, L. (1994) *Brandstofcel nadert précommerciële fase*, Chemisch Magazine, 14^{de} jaargang, nr. 10, oktober 1994, p. 424-427

Begg, D., Fischer, S. en Dornbusch, R. (2003) *Economics*, Mc Graw Hill, Berkshire, 552 p.

Bickel, P. en Friedrich, R. (2005) *ExternE: Externalities of Energy, Methodology 2005 Update*, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung – IER, Universität Stuttgart, Germany, 270 p.

Blauwens, G. (1988) *Welvaartseconomie en kosten-batenanalyse*, MIM NV, Deurne, 194 p.

Bradley, R. (2003) *JI/CDM – devilish linkages*, CAN Europe Hotspot: Climate & energy policy news from Europe, 29^{ste} jaargang, oktober 2003, Climate Action Network Europe, Brussel, p. 1

CONCAWE, EUCAR en JRC (Joint Research Centre of the EU Commission) (2004) *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, Well-to-Wheels Report Version 1b, 60 p.

CONCAWE, EUCAR en JRC (Joint Research Centre of the EU Commission) (2006) *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, Well-to-Wheels Report Version 2b, 88 p.

CONCAWE, EUCAR en JRC (Joint Research Centre of the EU Commission) (2007) *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, Tank-to-Wheels Report Version 2c, 9 p.

Crals, E., Keppens, M. en Vereeck, L. (2006) *De haalbaarheid van verhandelbare brandstofrechten. Een kwantitatieve transactiekostenanalyse*, Mobiliteit en (groot)stedenbeleid, VUB Press, Brussel, p. 349-378

Daems, W. (2006) *Natuur op Temperatuur*, Eos, 23^{ste} jaargang, nr. 2, februari 2006, NV Cascade, Antwerpen, p. 104-109

Dassen, H. (1990) *Kijk Omhoog*, Lannoo, Tielt, 128 p.

De Borger, B., Kerstens, K. en Van Dender, K. (1997) *Instrumenten voor een transportbeleid*, Mobiliteit: de juiste prijs, Apeldoorn, Leuven, p. 81-124

De Borger, B. en Proost, S. (2006) *Prijshervormingen in de transportsector, pendel en de arbeidsmarkt*, Mobiliteit en (groot)stedenbeleid, VUB Press, Brussel, p. 257-305

De Borger, B. en Proost, S. (1997) *Transportproblemen: de economische diagnose*, Mobiliteit: de juiste prijs, Apeldoorn, Leuven, p. 1-41

De Borger, B., Proost, S. en Van Dender, K. (1997) *Macro-economische aspecten van het transportbeleid*, Mobiliteit: de juiste prijs, Apeldoorn, Leuven, p. 125-147

De Brabander, B. (2005) *Investeringen in verkeersveiligheid in Vlaanderen: Een handleiding voor kosten-batenanalyse*, Lannoo Campus, Tielt, 183 p.

De Brabander, B. (2006) *Valuing the reduced risk of road accidents. Empirical estimates for Flanders based on stated preference methods. Doctoraatsproefschrift.*, Universiteit Hasselt, 305 p.

De Ceuster, G. (2004) *Internalisering van externe kosten van wegverkeer in Vlaanderen*, Transport & Mobility Leuven, Leuven, 146 p.

De Nocker, L., Int Panis, P., Mayeres, I. (2006) *De externe kosten van personenvervoer*, Mobiliteit en (groot)stedenbeleid, VUB Press, Brussel, p. 381-415

De Vlieger, I., et al. (Vito en VUB) (2001) *DWTC Project Contract Nummer MD/67/030: Maatregelen in de transportsector voor de vermindering van CO₂ en troposferische ozon*, Federale diensten voor wetenschappelijke, technische en culturele aangelegenheden, 8 p.

Draulans, D. (2006) *Wij maken het warmer*, Knack, 36^{ste} jaargang, nr. 46, 15-21 november 2006, p. 20-28

EcoTips (2006) *CO₂-emissierechten: aanbod groter dan vraag*, EcoTips, 11^{de} jaargang, nr. 2, april-mei 2006, Recorder bvba, Wingene, p. 48-50

European Commission Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological Studies (JRC-IPTS) en European Science and Technology Observatory (ESTO) (2003a) *Trends in Vehicle and Fuel Technologies: Review of Past Trends*, Report EUR 20746 EN, Europese Commissie, Spanje, 242 p.

European Commission Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological Studies (JRC-IPTS) en European Science and Technology Observatory (ESTO) (2003b) *Trends in Vehicle and Fuel Technologies: Scenarios for Future Trends*, Report EUR 20747 EN, Europese Commissie, Spanje, 186 p.

European Commission Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological Studies (JRC-IPTS) en European Science and Technology Observatory (ESTO) (2003c) *Trends in Vehicle and Fuel Technologies: Scenarios for Future Trends*, Report EUR 20748 EN, Europese Commissie, Spanje, 51 p.

European Environment Agency (EEA) (2005) *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2005*, EEA report nr. 8/2005, 52 p.

ExxonMobil (2006) *De voordelen van participatief milieubeleid*, Reflex, 6^{de} jaargang, oktober 2006, Buys, Antwerpen, p. 8-11

Exxonmobil Corporate Citizenship (2005) *The Outlook for Energy – a View to 2030*, 24 p.

Eyckmans, J. en Proost, S. (1998) *Klimaatonderhandelingen in Rio en Kyoto: een succesverhaal of een maat voor niets*, Centrum voor Economische Studiën, Leuven, 31 p.

Franco, D. (2006) *Milieutechnologie*, Universiteit Hasselt, 177 p.

Grubb, M. (2000) *The Kyoto-protocol: an economic appraisal*, Fondazione Eni Enrico Mattei Note di Lavoro Series, 33p.

Haelterman, A., Maes, L., Van Orshoven, P. (2005) *Codex Fiscaal Recht 2005-2006*, die keure, Brugge, 1304 p.

Hens, L. (2006) *Gevolgen voor de gezondheid van klimaatsveranderingen*, UVV-info (Unie Vrijzinnige Verenigingen vzw), 23^{ste} jaargang, nr.1, januari - februari 2006, Afgiftekantoor Brussel X, p. 6-9

Institute for European Environmental Policy (IEEP) (2005) *Service contract to carry out economic analysis and business impact assessment of CO2 emissions reduction measures in the automotive sector*, 123 p.

International Energy Agency (IEA) (2004) *World Energy Outlook 2004*, Frankrijk, 577 p.

Int Panis, L., et al. (2001) *Externe milieukosten van wegverkeer in België*. "XIXde Belgisch Wegencongres, Genval 2001", 10 p.

Int Panis, L., De Nocker, L., Cornelis, E. en Torfs, R. (2004) *Uncertainty analysis of air pollution externalities from road transport in Belgium in 2010*, Science of the Total Environment, nr. 334-335, p. 287-298

Jensen, J. en Thelle, M. (2001) *What are the Gains from a Multi-Gas Strategy?*, Fondazione Eni Enrico Mattei Note di Lavoro Series, 41 p.

Krause, K. (2003) *Driving better transport choices*, CAN Europe Hotspot: Climate & energy policy news from Europe, 29^{ste} jaargang, oktober 2003, Climate Action Network Europe, Brussel, p. 3

Laveren, E., et al. (2004) *Handboek Financieel Beheer*, Intersentia, Antwerpen, 723 p.

Louyet P. en Convié, I. (2006) *Impact van brandstoffen op het milieu. Minder vervuilen achter het stuur?*, Test-Aankoop, nr. 501, september 2006, p. 28-32

Mayeres, I. et al. (2001) *De externe kosten van transport: Syntheseverslag*, Centrum voor Economische Studiën, VITO, UFSIA, 12 p.

Mayeres, I. en Proost, S. (2004) *Een beter prijsbeleid voor de Belgische transportsector in 15 stellingen*, Katholieke Universiteit Leuven, Leuvense Economische Standpunten, 28 p.

Mayeres, I., Proost, S. en Van Dender, K. (1997) *Marginale externe kosten van transport: beschrijving, waardering en meting*, Mobiliteit: de juiste prijs, Apeldoorn, Leuven, p. 43-80

Minaraad, Milieu- en Natuurraad Vlaanderen (2006) *Advies van 4 mei 2006 over het voorstel van Vlaams Toewijzingsplan CO₂-emissierechten 2008-2012*, 22 p.

Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2006) *Ideeën voor energiebewust en veilig rijden*, 16 p.

Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Milieu-, Natuur-, Land-, en Waterbeheer, Afdeling Algemeen Milieu- en natuurbeleid, Sectie Lucht (2003) *Beleidsnota: actieprogramma milieuvriendelijke voertuigen en brandstoffen*, 85 p.

Ochelen, S., Proost, S. en Van Dender, K. (1997) *Optimale vervoersprijzen in de stad*, Mobiliteit: de juiste prijs, Apeldoorn, Leuven, p. 201-229

Otto, V., Löschel, A en Reilly, J. (2006) *Directed Technical Change and Climate Policy*, Fondazione Eni Enrico Mattei Note di Lavoro Series, 41 p.

Pergoot, J., Thys, I. en Van Derstappen, E. (1983) *Natuurkunde: 5: Elektriciteit*, De Garve, Brugge, 248 p.

Proost, S. et al. (2002) *Economische impact van de Kyoto-doelstellingen op de Vlaamse Economie*, 17 p.

Put, J. (2006) *Industriële scheikunde II*, Universiteit Hasselt, 270 p.

Rifkin, J. (2002) *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, 327 p.

Sauviller, R. (2006) *Is Biobrandstof dodelijk voor het milieu?*, Eos, 23^{ste} jaargang, nr. 2, februari 2006, NV Cascade, Antwerpen, p. 28-31

Schrooten, L. et al. (2005) *Costs and benefits of an enhanced reduction policy of particulate matter exhaust emissions from road traffic in Flanders*, Atmospheric Environment, nr. 40, p. 904-912

Thulkens, P., en Thulkens, H. (2006) *The White House and the Kyoto-protocol: Double Standards on Uncertainties and Their Consequences*, Fondazione Eni Enrico Mattei Note di Lavoro Series, 24 p..

Totten, M., Pandya, S., en Janson-Smith, T. (2003) *Biodiversity, climate, and the Kyoto-protocol: risks and opportunities*, Front Ecol Environ, 1^{ste} jaargang, nr. 5, 2003, p. 262-270

Transport & Mobility Leuven (2006) *Emissies van het wegverkeer in België 1990-2030*, 7 p.

United Nations (1998) *Kyoto-protocol to the United Nations Framework Convention in Climate Change*, 20 p.

Université Libre de Bruxelles (ULB) Centre d'Etudes Economiques et Sociales de l'Environnement (CEESE) (2004) *Convention CEESE-ELECTRABEL : Les implications du Protocole de Kyoto pour la Belgique*, 220 p.

Van Dooren, P. (1996) *Klimaat op hol*, Davidsfonds, Leuven, 130 p.

Van Herbruggen, B., en Proost, S. (2002) *Welvaartskosten van maatregelen ter reductie van CO₂-emissies in de transportsector*, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 33 p.

Van Mierlo, J. et al. (2006) *Milieuvriendelijke voertuigen*, Mobiliteit en (groot)stedenbeleid, VUB Press, Brussel, p. 447-490

Van Mierlo, J. en Macharis, C. (2006) *Goederen- en Personenvervoer*, UVV-info (Unie Vrijzinnige Verenigingen vzw), 23^{ste} jaargang, nr. 1, januari - februari 2006, Afgiftekantoor Brussel X, p. 28-33

Vlaamse Regionale Indicatoren (VRIND) (2002) *Focus : Duurzame ontwikkeling, Hoofdstuk 22*, p. 377-386

Vlaamse Regionale Indicatoren (VRIND) (2004/2005) *Vlaamse Regionale Indicatoren*, 434 p.

VUB (Vrije Universiteit Brussel), VITO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek) en CEESE (Centre d'Etudes Economiques et Sociales de l'Environnement) (2005) *Taak 4 Informatieve Gidsen: Bepalen van een Ecoscore voor voertuigen en toepassing van deze Ecoscore ter bevordering van het gebruik van milieuvriendelijke voertuigen*, 32p.

Witlox, F. (2006) *Stadsdistributie, dé oplossing voor de tanende (groot)stedelijke mobiliteit?*, Mobiliteit en (groot)stedenbeleid, VUB Press, Brussel, p. 239-254

Presentaties

Hecq, W. (2003) *Etablissement d'un indicateur environnemental adapté à l'ensemble des véhicules actuels ou à venir*, 1^{er} colloque internationale « Environnement et Transport », Avignon

Torfs, R. (2005) *Externe kosten toegepast op ozonconcentraties en reducties*, Studiedag ozon op leefmilieu, 25 oktober 2005

Seminaries, congressen en interviews

Blauwens, G. (2006) Panelgesprek, Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Machetto, G. (2006) Panelgesprek, Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Martens, M., (Febiac) (2006) Disputant op het Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Mayeres, I. (2006) *Externe kosten van personenvervoer*, Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Heremans, R. (2007) interview op 7 mei 2007

Immers, B. (2006) Panelgesprek, Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Ifest, vakbeurs voor milieu, technologie en arbeidsveiligheid (2006) 10 tot 13 oktober 2006, Flanders Expo Gent

Pecqueur, M (2007a) interview op 19 maart 2007

Pecqueur, M. (2007b) interview op 24 april 2007

Peeters, K., (vervangend spreker voor Yves Leterme) (2006) gastspreker, Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Pruyt, E. (2006) seminarie over ethiek, Universiteit Hasselt, 27 oktober 2006

Van Breedam, A. (2006) Panelgesprek, Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Van Mierlo, J. (2006) *Milieuvriendelijke voertuigen*, Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Wets, G. (2006) panelgesprek, Vlaams Wetenschappelijk Economisch Congres, 19 en 20 oktober 2006, Brussel

Websites

ACEA (European Automobile Manufacturers Association), (online) (geraadpleegd op 16 april 2007)
URL: www.acea.be/co2_emissions

Air Products, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)

URL: www.airproducts.com

Alpha, (online) (geraadpleegd op 17 april 2007)

URL: www.alpha.be

Aminal, (online) (geraadpleegd op 30 april 2007)

URL: www.mina.vlaanderen.be

Audi, (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.audi.com

België, Federale portaalsite, (online) (geraadpleegd op 30 april 2007)

URL: www.belgium.be

Ballard, (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.ballard.com

Bossel, U., Eliasson, B. en Taylor, G. (2005) *The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak ?*, (online) (geraadpleegd op 22 april 2007)

URL: www.efcf.com/e/reports/E08.pdf

BMW (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)

URL: www.press.bmwgroup.com

California Energy Department, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)

URL: www.energy.ca.gov

Carlson, E. et al. (2005) *Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation*, (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.tiaxllc.com

DaimlerChrysler, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)

URL: www.daimlerchrysler.com

De Bruijn, F. (2006) *Waterstof: de energiedrager van de toekomst*, ECN (Energy research Centre of the Netherlands), (online) (geraadpleegd op 17 april 2007)

URL: www.ecn.nl

Eaves S. en Eaves J., *A Cost Comparison of Fuel-Cell and Battery Electric Vehicles* (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)

URL: www.modenergy.com/BEV%20vsFCVs%20EavesEaves%20120603.pdf

Emis (Energie en Milieu Informatiesysteem voor het Vlaams Gewest), (online) (geraadpleegd op 16 oktober 2006)

URL: www.emis.vito.be/ShowPage.cfm?PageID=45&News_ID=1300

Emis (Energie en Milieu Informatiesysteem voor het Vlaams Gewest), (online) (geraadpleegd op 9 februari 2007)

URL: www.milieuvriendelijkvoertuig.be

Emissierechten.nl, (online) (geraadpleegd op 17 april 2007)

URL: www.emissierechten.nl

Energiesparen.be, (online) (geraadpleegd op 25 november 2006)

URL: www.energiesparen.be/reg/fossiele_brandstoffen.php

Energieraad Nederland, (online) (geraadpleegd op 26 september 2006)

URL: www.energieraad.nl/Adviezen/Adviezen%201998/983bij2.html

ECN (Energy research Centre of the Netherlands), (online) (geraadpleegd op 17 april 2007)

URL: www.ecn.nl

Electricity Storage Association, (online) (geraadpleegd op 20 mei 2007)

URL: www.electricitystorage.org

Europese Commissie, (online) (geraadpleegd op 26 september 2006)

URL: europa.eu.int/comm/environment/climat/kyoto.htm

Europees Parlement, (online) (geraadpleegd op 27 april 2007)

URL: www.europarl.europa.eu

Febiac, (online) (geraadpleegd op 30 april 2007)

URL: www.febiac.be

Federale Overheidsdienst Economie, (online) (geraadpleegd op 27 april 2007)

URL: statbel.fgov.be

Federale Raad voor Duurzame Ontwikkeling (FRDO), (online) (geraadpleegd op 12 oktober 2006)
URL: www.belspo.be/frdocfdd/nl/pubnl/adviezen/1999a10n.htm

Fiat, (online) (geraadpleegd op 17 april 2007)
URL: www.fiatautopress.com

Ford, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)
URL: www.ford.com

Fuelcellpark.com, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: www.fuelcellpark.com

Fuelcells2000, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: www.fuelcells.org

Fuel Cell Today (2006a) *Fuel Cell Today 2005 Worldwide Survey* (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles

Fuel Cell Today (2006b) *Fuel Cell Today Market Survey: Light Duty Vehicles* (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles

Fuel Cell Today (2007) *Fuel Cell Today Market Survey: Light Duty Vehicles* (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)
URL: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles

General Motors, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: www.gm.com

Honda, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: world.honda.com
URL: corporate.honda.com

Hydrogen and Fuel Cells Canada, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)
URL: www.h2cfuture.gc.ca/en/hydrogen-properties-e/html

Hydrogen Association, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)
URL: www.hydrogenassociation.org

HydroThane, (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.hydrothane.be

Interprovinciaal Overleg (IPO), (online) (geraadpleegd op 5 mei 2007)

URL: www.ipo.nl/documents/biobrandstoffen-compressed.pdf

Jones, T.P. (2004) *Is globale opwarming een 'massavernietigingswapen?'* (online) (geraadpleegd op 16 april 2007)

URL: www.yabasta.be

Klimaat.be, (online) (geraadpleegd op 11 oktober 2006)

URL: www.klimaat.be/inventemis/inventaris3.html

URL: www.klimaat.be/nl/emissieCO2.html

Klimaat.be, (online) (geraadpleegd op 25 mei 2007)

URL: www.climatechange.be

Knack.be – Dossiers: Klimaatverandering:

Pompen, E. (2005) *België maakt geen werk van alternatieve energie en energiebesparingen*, Trends, 8 december 2005, 2 p. (online) (geraadpleegd op 20 september 2006)

URL: [www2.knack.be/cmp/11/1555/45443/België maakt geen werk van alternatieve energie en energiebesparingen articel.htm](http://www2.knack.be/cmp/11/1555/45443/België_makkt_geen_werk_van_alternatieve_energie_en_energiebesparingen_articel.htm)

Knack.be – Dossiers: Klimaatverandering:

Kroonenberg, S. (2006) *De aarde gaat niet helemaal kapot*, Knack, 15 maart 2006, 6 p. (online) (geraadpleegd op 20 september 2006)

URL: [www2.knack.be/cmp/11/1534/44907/De aarde gaat niet helemaal kapot articel.htm](http://www2.knack.be/cmp/11/1534/44907/De_aarde_gaat_niet_helemaal_kapot_articel.htm)

Linde Gas, (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.lindegasbenelux.com

Maes, F., "*Compliance*" en het Kyoto-protocol, (online) (geraadpleegd op 16 oktober 2006)

URL: www.milieubeliedswetenschappen.be/exdocs/cmplianceFMkort.pdf

Maxell, (online) (geraadpleegd op 20 mei 2007)

URL: www.maxellcanada.com

Mazda, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)

URL: www.mazda.com

Milieu-info, (online) (geraadpleegd op 2 december 2006)

URL: www.lucht.milieuinfo.be

MIRA (2005) *Milieurapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2005, Hinder: Lawaai, Botteldooren D., Dekoninck L., De Muer T., Lauriks W., Caerels J., Bossuyt M.*, Vlaamse Milieumaatschappij, (online) (geraadpleegd op 17 april 2007)

URL: www.milieurapport.be

MIRA, (online) (geraadpleegd op 27 april 2007)

URL: www.milieurapport.be

National Renewable Energy Laboratory (NREL), (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)

URL: www.nrel.gov

Nissan, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)

URL: www.nissan-global.com

Nuvera, (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.nuvera.com

Ovonic, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)

URL: www.ovonic.com

Oy Hydrocell, (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.hydrocell.fi

Plug Power, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)

URL: www.plugpower.be

Prakken Edelmetaal, (online) (geraadpleegd op 10 april 2007)

URL: www.prakkenedelmetaal.nl

Quantum Sphere, (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.qsiano.com

Smart Fuel Cell,(online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)

URL: www.efoy.de

Tackle, E. (1997) *Global Warming Potential*, (online) (geraadpleegd op 17 oktober 2006)
URL: http://www.iitap.iastate.edu/gcp/gwpotential/gwpotential_lecture.html

Thijssen, J. (2005) *Viable and Sustainable Energy Strategies Grounded in Source-to-Service Analyses*, (online) (geraadpleegd op 22 april 2007)
URL: www.efcf.com/e/reports/E19.pdf

UCL (Université Catholique de Louvain) en Greenpeace (2004) *Impact van de klimaatverandering*, (online) (geraadpleegd op 16 april 2007)
URL: www.astr.ucl.ac.be/users/marbaix/impacts/

UNFCCC, (online) (geraadpleegd op 3 oktober 2006)
URL: unfccc.int/Kyoto_mechanisms/items/1673.php

United Nations Economic Commission for Europe, (online) (geraadpleegd op 2 december 2006)
URL: www.unece.org

US Department of Energy (USDOE), Energy Efficiency and renewable energy (online) (geraadpleegd op 31 maart 2007)
URL: www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells

USFCC (United States Fuel Cell Council) (2005a) *Fuel Cells for Mobility*, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)
URL: www.usfcc.com

USFCC (United States Fuel Cell Council) (2005b) *Fuel Cells and hydrogen: an Agenda for Action*, (online) (geraadpleegd op 4 april 2007)
URL: www.usfcc.com

Vlaams Parlement, (online) (geraadpleegd op 30 april 2007)
URL: www.vlaamsparlement.be

VOKA (Kamer van Koophandel), (online) (geraadpleegd op 16 april 2007)
URL: www.voka.be

VROM, (online) (geraadpleegd op 2 december 2006)
URL: www.VROM.nl

VSB (Vlaams Samenwerkingsverband Brandstofcellen), (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: www.vsb-vzw.be

Werner, C. (2000) *Fuel Cell Fact Sheet*, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: www.eesi.org/publications/0200fuelcell.pdf

Wurster, R. (2005a) *Posibilidades de obtención de hidrógeno para propulsar el transporte*, (online) (geraadpleegd op 25 maart 2007)
URL: www.hyweb.de/Wissen/docs2005/POSIBILIDADES_OBTENCION_H2_PARA_TRANSPORTE_Manuscrito_07JUL2006.pdf

Wurster, R. (2005b) (online) (geraadpleegd op 5 april 2007)
URL: www.hyweb.de/Wissen/docs2005/Posibilidades_H2_Automocion_presentacion_27OCT2005_FINAL.pdf

BIJLAGEN

INHOUDSOPGAVE VAN DE BIJLAGEN

Bijlage 1: evolutie van het wegverkeer tussen 1990-2030

Bijlage 2: Evolutie van de emissies van het wegverkeer

Bijlage 3: Schematische voorstelling van de route-effectbenadering

Bijlage 4: Externe milieukost

Bijlage 5: Welvaartsverlies

Bijlage 6: Annex I, Annex II en Annex B landen

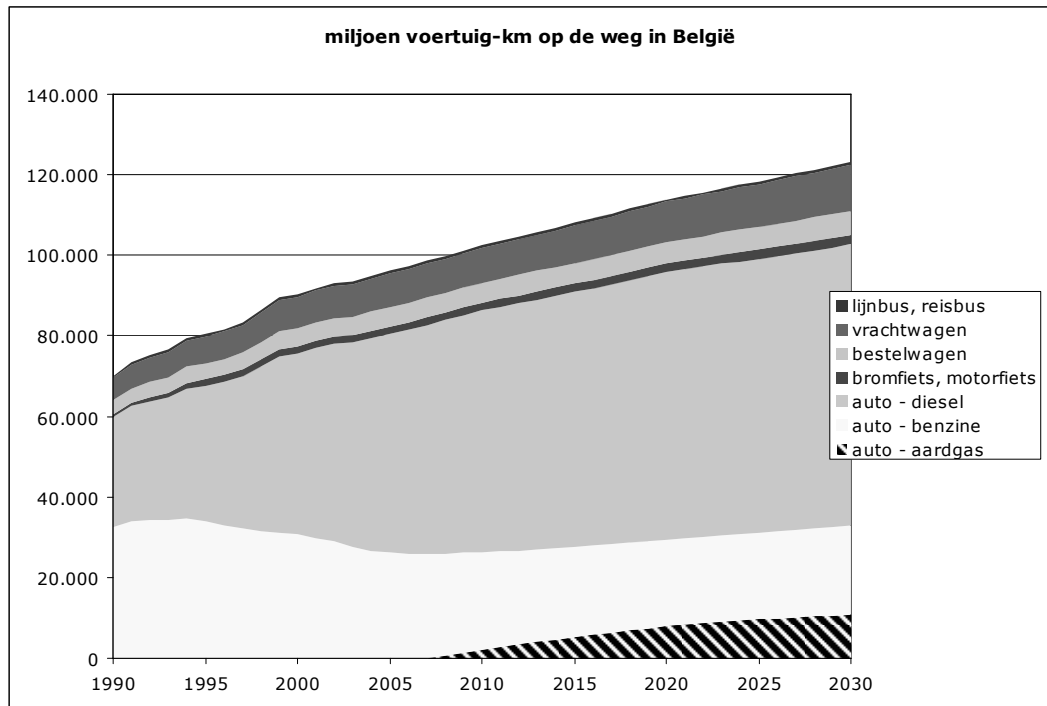
Bijlage 7: Duurzame ontwikkeling

Bijlage 8: Kosten-batenanalyse

Bijlage 9: Onderhoudskosten

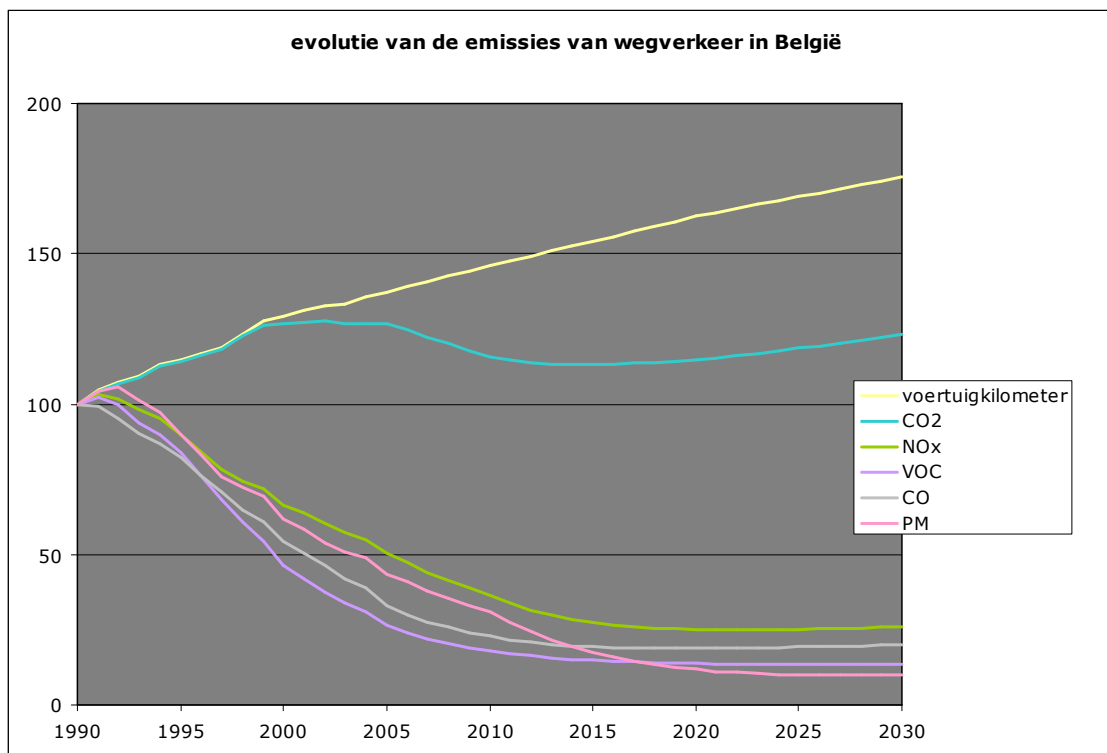
Bijlage 10: Uitgebreide berekeningen

Bijlage 1: Evolutie van het wegverkeer tussen 1990-2030



Figuur A1: Evolutie van het wegverkeer (Transport & Mobility Leuven, 2006: 1)

Bijlage 2: Evolutie van de emissies van het wegverkeer



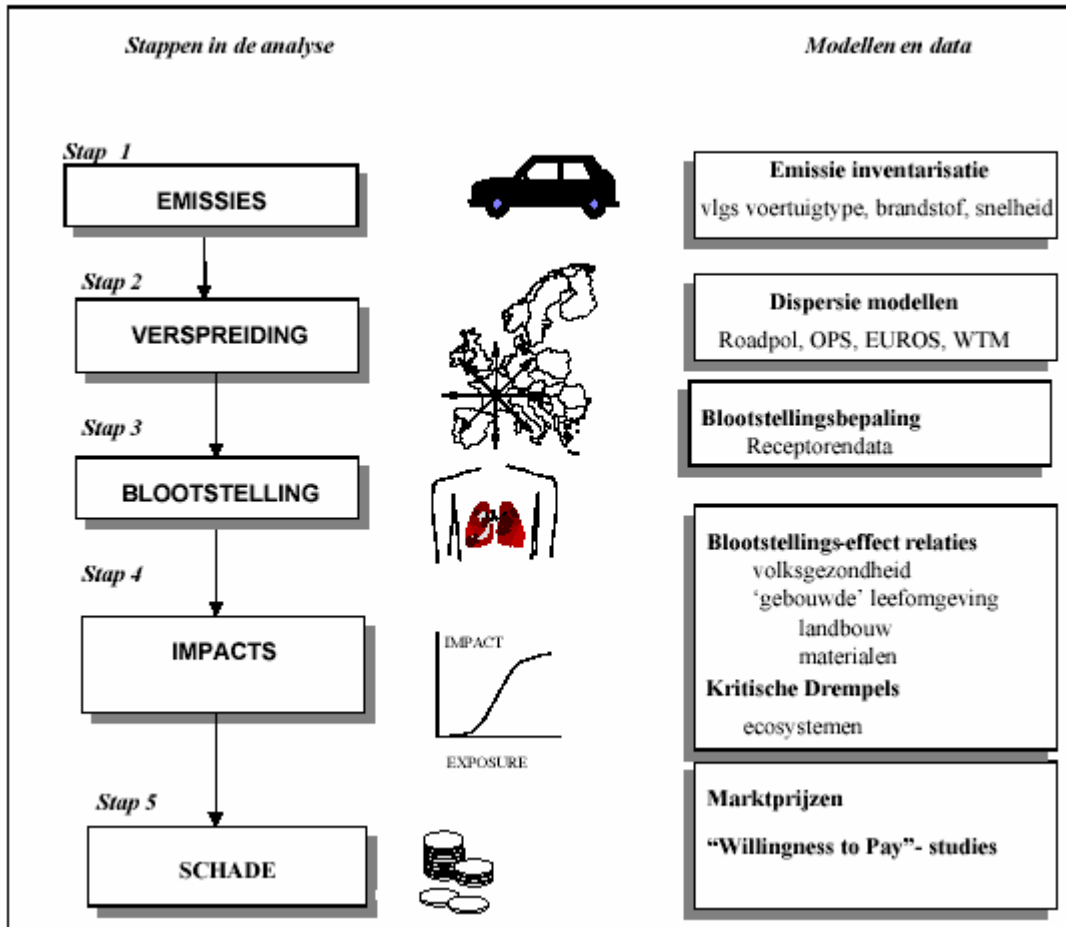
Figuur A2: Evolutie van de emissies van het wegverkeer (Transport & Mobility Leuven, 2006: 3)

Tabel A2: Evolutie van de emissies van het wegverkeer 1990-2030

		EMISSIES WEGVERKEER													
		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2011	2012	2013*
CO ₂	kton	11.283	11.759	12.061	12.197	12.641	12.741	12.894	13.140	13.486	13.926	13.949	13.977	14.088	14.062
CO	ton	412.120	393.486	372.113	322.169	301.965	280.122	259.137	246.286	232.875	222.231	204.901	191.234	178.166	167.933
SO ₂	ton	9.030	9.465	9.719	9.949	10.382	10.536	4.030	4.100	4.206	4.339	1.851	1.870	1.903	405
NO _x (NO ₂)	ton	102.641	105.623	106.269	102.009	101.583	97.971	95.689	95.290	95.919	96.913	95.089	92.928	90.593	87.809
NMVOStof	ton	81.393	80.457	77.760	67.636	62.748	57.051	50.989	46.242	41.262	36.028	30.870	26.831	23.323	20.576
stof	ton	6.962	7.314	7.438	7.343	7.329	7.073	6.750	6.361	6.013	5.618	5.092	4.652	4.273	4.021
N ₂ O	ton	668	706	745	825	913	980	1.049	1.124	1.205	1.295	1.337	1.370	1.405	1.416
CH ₄	ton	1.979	2.010	2.008	1.862	1.814	1.731	1.627	1.527	1.413	1.309	1.157	1.040	940	851
NH ₃	ton	91	120	200	390	556	695	840	952	1.058	1.168	1.217	1.233	1.244	1.219

Bron: VRIND (2004/2005: 317)

Bijlage 3: Schematische voorstelling van de route-effect benadering



Figuur A3: Schematische voorstelling van de route-effect benadering (Int Panis et al, 2001: 2)

Bijlage 4: Externe milieukost**Tabel A4: Externe milieukost per kilometer in eurocent in functie van de evolutie van het wagenpark**

Jaar	Autosnelweg			Stedelijk			Landelijk		
	Pers.	Vracht.	Bus	Pers.	Vracht.	Bus	Pers.	Vracht.	Bus
2000	1,1877	5,0931	6,8394	2,2194	8,7241	5,2927	0,4199	2,0730	5,3365
2001	1,099	4,5288	6,8173	2,0452	7,9618	5,1880	0,3902	1,8455	5,327
2002	1,0126	3,9873	6,5677	1,8755	7,2302	5,0721	0,3613	1,6271	5,1403
2003	0,9283	3,4672	6,3053	1,7101	6,5276	4,9478	0,3332	1,4174	4,9437
2004	0,8461	2,9676	6,0232	1,5487	5,8529	4,8094	0,3057	1,2160	4,7325
2005	0,7659	2,4869	5,3759	1,3914	5,2034	4,6569	0,2789	1,0222	4,2403
2006	0,7022	2,2837	5,1799	1,2675	4,8829	4,5220	0,2589	0,9367	4,0998
2007	0,6387	2,084	4,9554	1,1440	4,5681	4,3675	0,2389	0,8526	3,9388
2008	0,5754	1,8879	4,6954	1,0209	4,2587	4,1887	0,2190	0,7701	3,7525
2009	0,5124	1,6951	4,3911	0,8983	3,9547	3,9794	0,1991	0,6890	3,5343
2010	0,4496	1,5057	4,0299	0,7761	3,6560	3,7311	0,1794	0,6092	3,2754
2011	0,4207	1,4668	3,9797	0,7228	3,5622	3,5615	0,1692	0,5926	3,2562
2012	0,3925	1,4292	3,9201	0,6705	3,4717	3,3599	0,1592	0,5765	3,2334
2013	0,3649	1,3929	3,8481	0,6193	3,3841	3,1164	0,1494	0,5610	3,2058
2014	0,3378	1,3577	3,7594	0,5692	3,2994	2,8163	0,1398	0,5459	3,1719
2015	0,3112	1,3237	3,6473	0,5200	3,2174	2,4374	0,1304	0,5314	3,129
2016	0,307	1,3237	3,6445	0,5129	3,2173	2,3763	0,1287	0,5313	3,134
2017	0,3028	1,3236	3,6408	0,5058	3,2171	2,2978	0,1271	0,5313	3,1403
2018	0,2986	1,3236	3,6359	0,4986	3,2170	2,1933	0,1254	0,5313	3,1488
2019	0,2944	1,3236	3,6291	0,4915	3,2169	2,0470	0,1237	0,5313	3,1607
2020	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2021	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2022	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2023	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2024	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2025	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2026	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2027	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2028	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2029	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2030	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2031	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2032	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785
2033	0,2902	1,3235	3,6188	0,4843	3,2168	1,8280	0,1220	0,5313	3,1785

Pers. = personenwagen / Vracht. = vrachtwagen

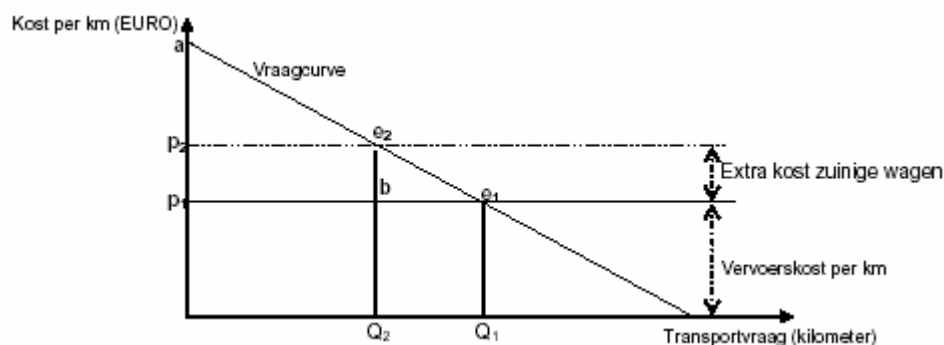
Bron: De Brabander (2005: 169)

De evolutie in bovenstaande tabel heeft geen betrekking op een toename of afname van het aantal voertuigen of het aantal afgelegde kilometer. De evolutie heeft enkel betrekking op de verandering in het aandeel van verschillende brandstof- en motortypes.

Bijlage 5: Welvaartsverlies

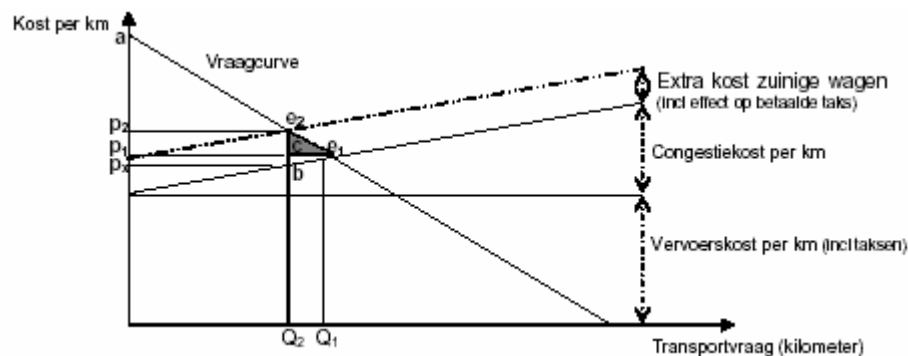
Economisten meten het welvaartsverlies dat gepaard gaat met het invoeren van een maatregel via een verandering in het consumentensurplus. (Van Herbruggen en Proost, 2002) Het consumentensurplus wordt gedefinieerd als het verschil tussen de bereidheid tot betalen van de consument en de prijs die hij werkelijk betaalt, of met andere woorden het verschil tussen de vraagcurve en de marktprijs. (De Brabander, 2005; Van Herbruggen en Proost, 2002; De Borger en Proost, 1997; Blauwens, 1988) De vraagcurve geeft weer hoeveel goederen de consument wil kopen bij een veranderende prijs. De vraagcurve verloopt normaalgezien dalend, bij een hogere prijs is de gevraagde hoeveelheid bijgevolg kleiner. Op de markt zal uiteindelijk maar één bepaalde hoeveelheid worden aangeboden, namelijk die hoeveelheid waar de vraag- en aanbodscurve elkaar snijden. (Begg, Fischer en Dornbusch, 2003)

Het consumentensurplus geeft de nettobaat weer voor de consument bij de invoering van een bepaalde maatregel. In de volgende figuur worden de vraagcurve en het consumentensurplus geïllustreerd. Het consumentensurplus wordt gevormd door de oppervlakte van de driehoek ae_1p_1 . Wanneer er nu een maatregel wordt ingevoerd, bijvoorbeeld het verplichte gebruik van duurdere wagens die minder brandstof verbruiken, zal de kost per vervoerskilometer toenemen. Deze stijging is het gevolg van de stijgende aankoopprijs van de wagens, want hoewel de brandstofkosten afnemen, het nettoresultaat is een stijging van de vervoerskosten. Hierdoor neemt het aantal gereden kilometers af van Q_1 naar Q_2 . De introductie van de zuinige wagen gaat gepaard met een welvaartsverlies gelijk aan het initiële consumentensurplus (ae_1p_1) verminderd met het consumentensurplus na invoering van de maatregel (ae_2p_2). Het welvaartsverlies is bijgevolg gelijk aan de oppervlakte $p_2e_2e_1p_1$. (Van Herbruggen en Proost, 2002) Dit welvaartsverlies bestaat uit twee componenten: het welvaartsverlies van de consumenten die niet meer rijden e_2e_1b en de verhoogde kosten voor de consumenten die blijven rijden $p_2e_2bp_1$. Dit voorbeeld heeft betrekking op een vereenvoudigde transportmarkt zonder belastingen. In de figuur erna wordt een meer complex voorbeeld gegeven om het welvaartsverlies van een maatregel te illustreren.



Figuur A5a: Consumentensurplus (Van Herbruggen en Proost, 2002:7)

In de volgende figuur houden we wel rekening met taken en met de tijdswaardering van de reiziger. De reiziger zal een kost associëren aan de tijd die hij onderweg is. Hoe langer hij onderweg is, hoe hoger de kost. Deze kost wordt voorgesteld door de congestiekost per kilometer, een kost die dus toeneemt naargelang de transportvraag stijgt en bijgevolg door een stijgende curve wordt voorgesteld op de onderstaande figuur. Een tweede verandering ten opzichte van bovenstaande figuur is de opname van taken in de figuur. De aankoopprijs, met daarin vervat ook de taken, van de wagens neemt toe door de invoering van een duurdere, zuinigere wagens (dezelfde maatregel als in het vorige voorbeeld). De brandstofkosten per kilometer en ook de brandstoftaksen, nemen af bij de introductie van de maatregel. Het nettoresultaat is nog steeds een stijging van de vervoerskosten per kilometer. Door de stijging van de vervoerskosten, zal de transportvraag afnemen en hierdoor zal ook de congestiekost per kilometer dalen omdat er minder gereden wordt. De grijze oppervlakte in de figuur geeft de afname van het consumentensurplus of met andere woorden het welvaartsverlies weer. (Van Herbruggen en Proost, 2002)

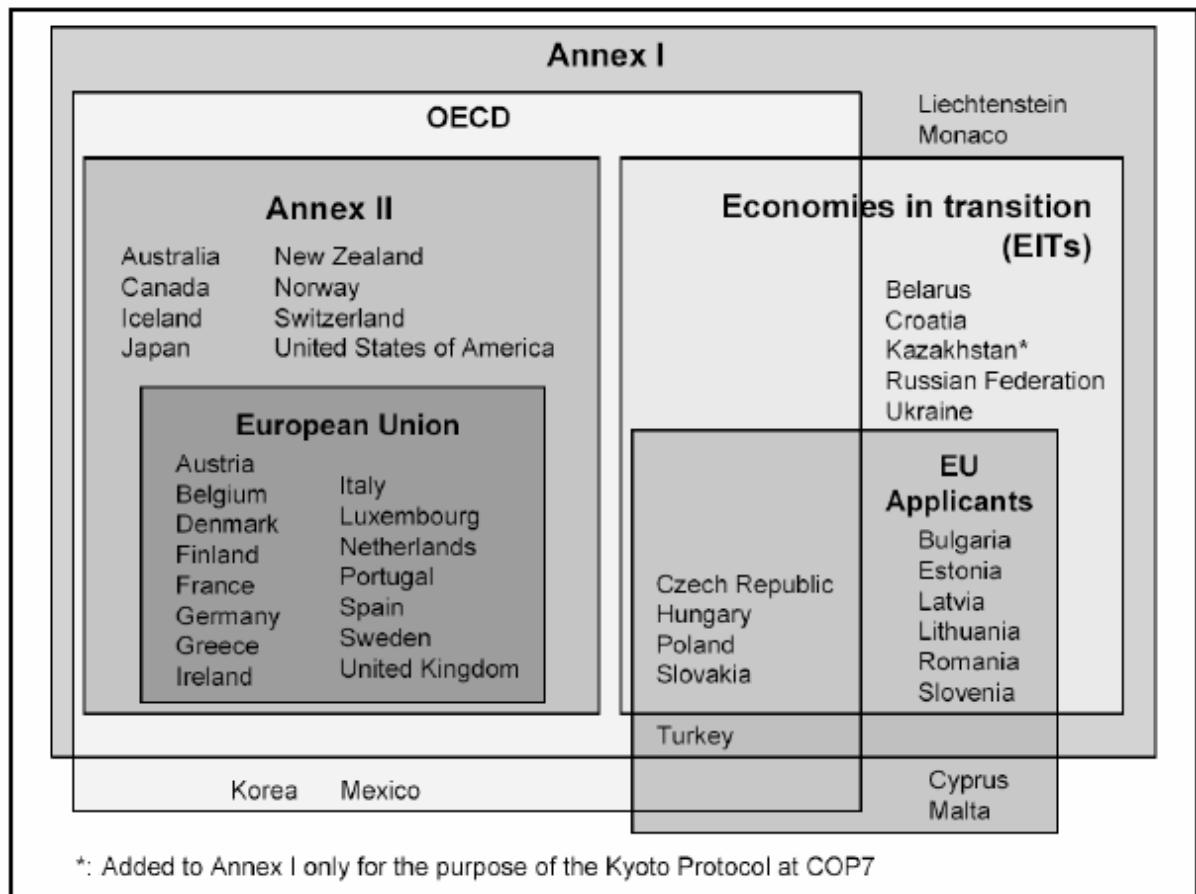


Figuur A5b: Welvaartsverlies op een vereenvoudigde transportmarkt met congestiekosten en taken (Van Herbruggen en Proost, 2002:9)

Bij dit tweede voorbeeld mogen we niet vergeten dat deze maatregel met zich meebrengt dat de inkomsten van de overheid afnemen doordat de inkomsten op de brandstoftaksen afnemen. Wanneer de overheid dan op een ander vlak de belastingen verhoogt om een even groot budget te houden, of haar budget laat dalen maar dan minder subsidies geeft, zorgt dit voor een verlies in welvaart bij de bevolking.

Externe effecten, bijvoorbeeld externe milieukosten, waar de consument dus geen rekening mee houdt, zitten niet vervat in het consumentensurplus, maar ze hebben wel een invloed op de welvaart van de samenleving, zoals besproken is in hoofdstuk 2.

Bijlage 6: Annex I, Annex II en Annex B landen



Figuur A6: Annex I en Annex II (Höhne et al., 2003; geciteerd door CEESSE, 2004:46)

Deze figuur moet nu een beetje aangepast worden. Alle landen die in de figuur zijn opgenomen onder de EU Applicants, behalve Turkije, zijn ondertussen namelijk lidstaten van de Europese Unie geworden.

Tabel A6: Annex I, Annex II, Annex B

Country	Member of Annex I	Member of Annex II	Economy in transition	Commitment inscribed in Annex B (in the EU burden sharing agreement)
Australia	X	X		108
Austria	X	X		92 (87)
Belarus	X		X	****
Belgium	X	X		92 (92.5)
Bulgaria	X		X	92
Canada	X	X		94
Croatia	X*		X	95
Czech Republic	X*		X	92
Denmark	X	X		92 (79)
Estonia	X		X	92
European Community	X	X		92
Finland	X	X		92 (100)
France	X	X		92 (100)
Germany	X	X		92 (79)
Greece	X	X		92 (125)
Hungary	X		X	94
Iceland	X	X		110
Ireland	X	X		92 (113)
Italy	X	X		92 (93.5)
Japan	X	X		94
Kazakhstan	X**		X	To be negotiated
Latvia	X		X	92
Liechtenstein	X*			92
Lithuania	X		X	92
Luxembourg	X	X		92 (72)
Monaco	X*			92
Netherlands	X	X		92 (94)
New Zealand	X	X		100
Norway	X	X		101
Poland	X		X	94
Portugal	X	X		92 (127)
Romania	X		X	92
Russian Federation	X		X	100
Slovakia	X*		X	92
Slovenia	X*		X	92
Spain	X	X		92 (115)
Sweden	X	X		92 (104)
Switzerland	X	X		92
Turkey	X	***		****
Ukraine	X		X	100
United Kingdom	X	X		92 (87.5)
United States of America	X	X		93

*: Added to Annex I at the third conference of the Parties in Kyoto 1997 (COP 3)

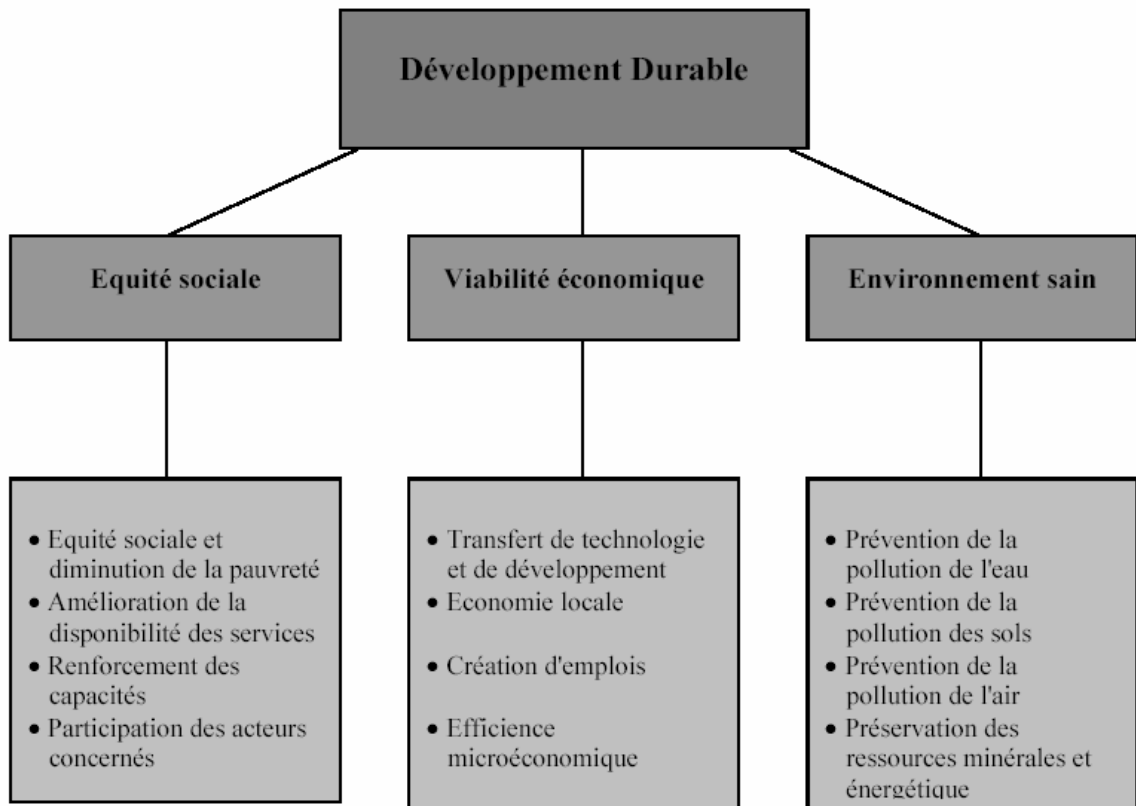
** : Added at COP7 only for the purpose of the Kyoto Protocol (see FCCC/CP/2001/13/Add.4, section V.C)

***: Deleted from Annex II by decision 26/CP.7

****: No limit specified. Country had not ratified the Convention when Kyoto Protocol was adopted

Bron: UNFCC geciteerd door CEESA (2004:49)

Bijlage 7: Duurzame ontwikkeling

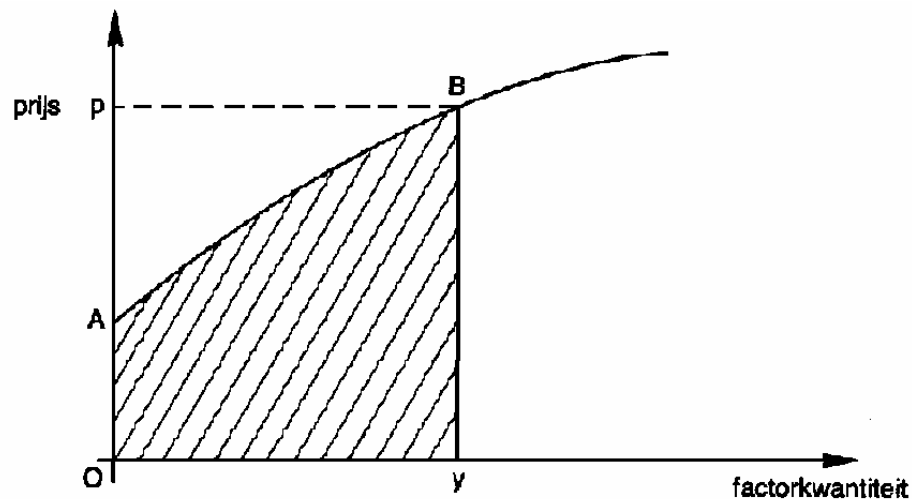


Figuur A7: Duurzame ontwikkeling (CEESE, 2004: 113)

Bijlage 8: Kosten-batenanalyse

Kosten-batenanalyse is een techniek die gebruikt wordt om investeringen te beoordelen vanuit een sociaal-economisch standpunt. Deze methode bekijkt de investering vanuit het oogpunt van de hele gemeenschap. Alle effecten van het project worden omgezet in geldeenheden om een vergelijking te kunnen maken tussen verschillende projecten en om de verschillende effecten binnen één project optelbaar te maken om zo het kosten-batensaldo te kunnen vaststellen. Wanneer het kosten-batensaldo negatief is, mag een project niet worden uitgevoerd. Het kosten-batensaldo wordt berekend door de kosten en baten op te tellen, kosten met een minteken, baten met een plusteken. (Blauwens, 1988)

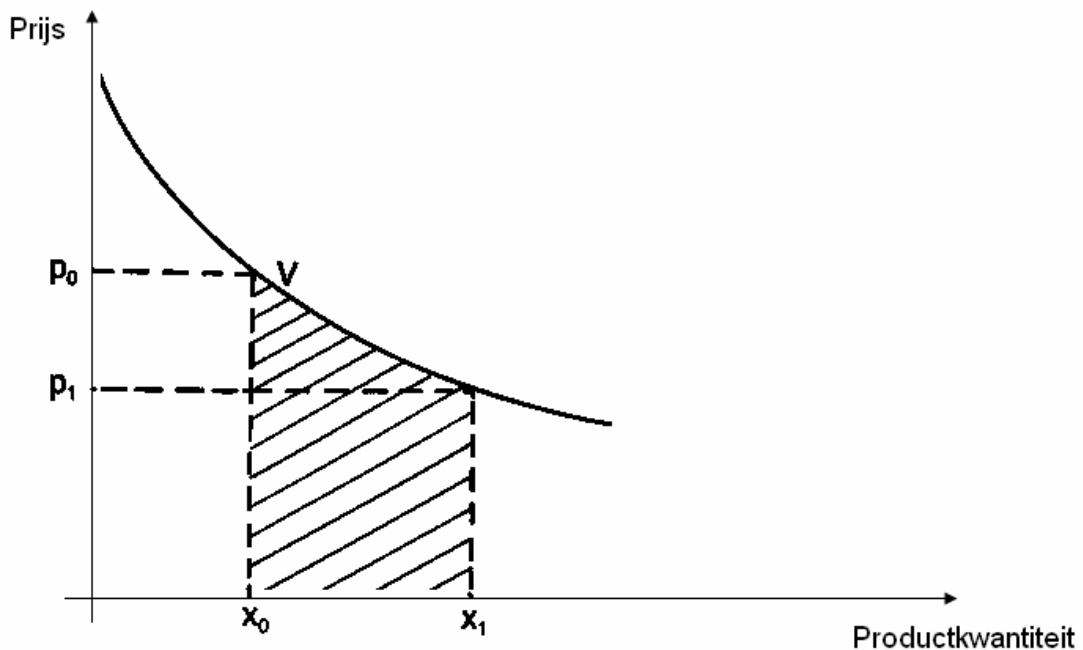
De kosten worden gelijkgesteld aan de oppervlakte onder de aanbodscurve. Dit geeft de totale betalingsbereidheid weer van de gebruikers van de factoren, zoals bijvoorbeeld arbeid. In onderstaande figuur zijn de totale kosten gelijk aan de oppervlakte OyBp.



Figuur A8a: De kosten (Blauwens, 1988: 141)

De baten zijn terug te vinden onder de vraagcurve en geven de betalingsbereidheid van de productgebruikers weer. Dit is de som van de marginale betalingsbereidheden van de productgebruikers. De baten bestaan uit twee delen, namelijk de totale ontvangsten voor de uitbater van het project en het consumentensurplus. Wanneer het gaat om een kwaliteits- of hoeveelheidsverbetering van een bestaand project, mag ook enkel de verandering in totale baten in acht genomen worden. (Blauwens, 1988) De Brabander (2005) voegt hieraan toe dat een kosten-batenanalyse geen voor-of-na-analyse is, maar een met-of-zonder-analyse. Er moet nagegaan worden wat het project verandert aan de totale baten en kosten. Het gaat dus over incrementele kosten of baten.

In een voor-of-na-analyse kunnen verkeerdelijk kosten en baten worden toegevoegd die ook zonder de uitvoering van het project zouden ontstaan. In onderstaande figuur wordt door het project een grotere hoeveelheid van een bepaald product beschikbaar. De oorspronkelijke prijs en hoeveelheid zijn p_0 en x_0 . Door het project uit te voeren verschuiven de prijs en de kwaliteit respectievelijk naar p_1 en x_1 . De baat van het project wordt weergegeven door het gearceerde gebied. Het zou verkeerd zijn om ook de oppervlakte voor x_0 onder de vraagcurve in ogenschouw te nemen als een baat omdat deze al bestond voor de uitvoering van het project.



Figuur A8b: De baten (Blauwens, 1988:140)

De economie vertoont onvolmaaktheden. Hierdoor kan het zijn dat het beter is om additionele kosten of baten, dus naast de oppervlaktes onder de aanbod- en vraagcurve, op te nemen in de kosten-batenanalyse. Er zijn wel drie voorwaarden waaraan een bijkomende kost of baat moet voldoen volgens Blauwens (1988).

- a) Er is een fout in de economie, zoals werkloosheid of niet aangerekende milieukosten.
- b) De algemene maatregel om deze fout te herstellen, kan niet toegepast worden, bijvoorbeeld om politieke redenen.
- c) Het is wel aanvaardbaar om de fout te corrigeren via onderzochte overheidsinvesteringen. Zo kan er bijvoorbeeld politiek gezien wel geld uitgegeven worden aan duurdere overheidsinvesteringen als daardoor meer werkgelegenheid of lagere milieukosten worden bekomen.

Er moet een verschil gemaakt worden tussen pecuniaire en technologische externe effecten. Pecuniaire effecten mogen niet opgenomen worden in een kosten-batenanalyse omdat ze enkel leiden tot een verandering in de relatieve prijzen op de markten en geen wijziging in de werkelijke productie- of consumptiemogelijkheden van buitenstaanders tot gevolg hebben. Dit betekent dat er enkel een inkomenshervreiding plaatsvindt; er wordt geen baat gecreëerd. Technische effecten hebben betrekking op de veranderingen in de mogelijkheden van technische productie en dienen wel opgenomen te worden in een kosten-batenanalyse. (De Brabander, 2005; Blauwens, 1988)

Bijlage 9: Onderhoudskosten

In onderstaande tabel wordt de onderhoudskost van een benzinewagen weergegeven over de hele levensduur wanneer hij 15 000 km/jaar aflegt op basis van de gegevens van dhr. Heremans (2007), verdeler van Volvo. In de derde kolom wordt dezelfde onderhoudskost berekend wanneer er wel verdisconteerd wordt. De gebruikte discontovoet is 4 %.

Tabel A9a: Onderhoudskost benzinewagen

Jaar	Onderhoud (EUR) (smeren, uurloon, banden en remmen)	Verdisconteerde onderhoudskost (discontovoet 4 %)
1	75	75
2	210	202,02
3	210	194,25
4	300	266,7
5	75 + 450 (banden)+ 150 (remmen voor)	577,125
6	210 + 120 (remmen achter)	271,26
7	210	165,9
8	300 + 220 (riemen, rollen)	395,2
9	75	54,825
10	210 + 450 (banden) + 150 (remmen voor) + 100 (remschijven)	639,73
11	210 + 120 (remmen achter)	223,08
12	300	195
13	75	46,875
TOTAAL	4 220	3 306,965

De onderhoudskost van LPG is hetzelfde als die van benzine behalve dat het onderhoud meer tijd kost. Hierdoor komt er elk jaar 80 EUR uurloon bij. (Heremans, 2007) De onderhoudskost van LPG komt dan niet verdisconteerd terecht op 5 260 EUR en verdisconteerd op 4 137,765 EUR.

In de volgende tabel worden schematisch de onderhoudskosten weergegeven die in de berekeningen werden gebruikt, met daarnaast de verdisconteerde onderhoudskosten voor alle alternatieven. De onderhoudskost van de elektrische wagen en het brandstofcelvoertuig wordt gelijkgesteld aan 70 % van de onderhoudskost van de benzinewagen (Emis, 2007). Er worden in bijlage 10 ter vergelijking ook enkele totaalkosten berekend wanneer de onderhoudskost van de elektrische wagen en de brandstofcelwagen nog minder zou bedragen.

Tabel A9b: Onderhoudskosten verschillende technologieën

Technologie	Onderhoudskost (EUR)	Onderhoudskost (verdisconteerd) (EUR)
Benzine	4 220	3 306,965
LPG	5 260	4 137,765
Aardgas	5 260	4 137,765
Waterstofverbrandingsmotor	5 260	4 137,765
Biobrandstoffen	4 220	3 306,965
Elektrische motor	2 954	2 314,86
Brandstofcellen	2 954	2 314,86

Bijlage 10: Uitgebreide berekeningen

In de onderstaande tabellen worden de uitgebreide berekeningen weergegeven. In de bovenste lijn van de tabel wordt steeds verwezen naar de tabel in hoofdstuk 5 waarin de berekeningen zijn gebruikt.

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	9 EUR/ton CO₂		Tabel 18		
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
	Benzine (referentie)	aardgas	waterstof verbrandings- motor	Biobrandstoffen	
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)					
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00		16.565,00
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00		230,00
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00		2.310,00
brandstoftank	125,00	1.838,00	10.350,00		125,00
onderhoud, smeermiddelen en olie	4.220,00	5.260,00	5.260,00		4.220,00
brandstof	9.010,52	10.237,50	11.700,00		16.087,50
TOTAAL		32.230,52	38.950,50	48.925,00	39.537,50
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	0,00	54,98	167,32		101,59
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,00	1,13	0,94		0,80
NO _x	0,00	28,66	-119,43		9,95
SO ₂	0,00	161,79	122,96		215,71
PM	0,00	100,32	45,60		53,20
NMVOS	0,00	208,96	269,45		-283,20
geluidshinder	0,00	0,00	0,00		0,00
totale vermeden externe kost		0,00	555,84	486,85	98,06
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range		200 km tot 300 km			beperkte landbouwareaal
TOTALE KOST PER VOERTUIG		32.230,52	38.394,66	48.438,15	39.439,44
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		2.479,27	2.953,44	3.726,01	3.033,80

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	9 EUR/ton CO₂		Tabel 18		
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
	Elektrische motor	Hybride voertuigen	Brandstofcellen	LPG	
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)	(PM = 70 %)	(batterij van 6 kWh)	(met batterij)		
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00		16.565,00
ombouwkost	0,00	600,00			2.000,00
aandrijving	2.160,00	4.400,00	11.780,00		2.310,00
brandstoftank	6.500,00	125,00	10.350,00		1.625,00
onderhoud, smeermiddelen en olie	2.954,00		2.954,00		5.260,00
brandstof	3.217,50	6.037,20	11.700,00		9.243,00
TOTAAL		31.396,50	27.727,20	53.349,00	37.003,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	174,49	78,88	174,49		16,73
CO (gezondheid + broeikaseffect)	2,34	2,12	2,34		1,25
NO _x	24,68	24,28	24,68		3,98
SO ₂	122,96	84,13	122,96		99,23
PM	45,60	59,28	45,60		48,64
NMVOS	272,20	126,48	272,20		162,22
geluidshinder	143,47	0,00	143,47		0,00
totale vermeden externe kost		785,74	375,17	785,74	332,05
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range	80 km tot 120 km				
TOTALE KOST PER VOERTUIG		30.610,76	27.352,03	52.563,26	36.670,95
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		2.354,67	2.104,00	4.043,33	2.820,84
indien onderhoudskost 70 % van benzine		30.610,76		52.563,26	
indien onderhoudskost 60 % van benzine		30.188,76		52.141,26	
indien onderhoudskost 50 % van benzine		29.766,76		51.719,26	
indien onderhoudskost 40 % van benzine		29.344,76		51.297,26	
indien onderhoudskost 30 % van benzine		28.922,76		50.875,26	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	20 EUR/ton CO₂		Tabel 18		
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
	Benzine (referentie)	aardgas	waterstof verbrandings-	motor	Biobrandstoffen
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)					
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	230,00	230,00
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.310,00	2.310,00
brandstoftank	125,00	1.838,00	10.350,00	125,00	125,00
onderhoud, smeermiddelen en olie	4.220,00	5.260,00	5.260,00	4.220,00	4.220,00
brandstof	9.010,52	10.237,50	11.700,00	16.087,50	16.087,50
TOTAAL		32.230,52	38.950,50	48.925,00	39.537,50
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	0,00	122,17	371,83	225,75	225,75
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,00	1,13	0,94	0,80	0,80
NO _x	0,00	28,66	-119,43	9,95	9,95
SO ₂	0,00	161,79	122,96	215,71	215,71
PM	0,00	100,32	45,60	53,20	53,20
NMVOS	0,00	208,96	269,45	-283,20	-283,20
geluidshinder	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
totale vermeden externe kost		0,00	623,03	691,35	222,22
niet gekwantificeerde meerkost					beperkte landbouwareaal
beperkte range			200 km tot 300 km		
TOTALE KOST PER VOERTUIG		32.230,52	38.327,47	48.233,65	39.315,28
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		2.479,27	2.948,27	3.710,28	3.024,25

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	9 EUR/ton CO₂		Tabel 18	
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig				
	Brandstofcel	hernieuwbare bronnen	Elektrische motor	
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)			(PM = 132 %)	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost			0,00	
aandrijving	11.780,00		2.160,00	
brandstoftank	10.350,00		6.500,00	
onderhoud, smeermiddelen en olie	2.954,00		2.954,00	
brandstof	11.700,00		3.217,50	
TOTAAL		53.349,00	31.396,50	
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)				
CO ₂	239,03		174,49	
CO (gezondheid + broeikaseffect)	2,36		2,34	
NO _x	39,81		24,68	
SO ₂	215,71		122,96	
PM	152,00		-48,64	
NMVOS	274,95		272,20	
geluidshinder	143,47		143,47	
totale vermeden externe kost		1.067,34	691,50	
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range			80 km tot 120 km	
TOTALE KOST PER VOERTUIG		52.281,66	30.705,00	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		4.021,67	2.361,92	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	20 EUR/ton CO₂	Tabel 18			
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)	Elektrische motor	Hybride voertuigen	Brandstofcellen	LPG	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	0,00	600,00			2.000,00
aandrijving	2.160,00	4.400,00	11.780,00		2.310,00
brandstoftank	6.500,00	125,00	10.350,00		1.625,00
onderhoud, smeermiddelen en olie	2.954,00		2.954,00		5.260,00
brandstof	3.217,50	6.037,20	11.700,00		9.243,00
TOTAAL		31.396,50	27.727,20	53.349,00	37.003,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	387,76	175,29	387,76		37,18
CO (gezondheid + broeikaseffect)	2,34	2,12	2,34		1,25
NO _x	24,68	24,28	24,68		3,98
SO ₂	122,96	84,13	122,96		99,23
PM	45,60	59,28	45,60		48,64
NMVOS	272,20	126,48	272,20		162,22
geluidshinder	143,47	0,00	143,47		0,00
totale vermeden externe kost		999,01	471,58	999,01	352,50
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range	80 km tot 120 km				
TOTALE KOST PER VOERTUIG		30.397,49	27.255,62	52.349,99	36.650,50
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		2.338,27	2.096,59	4.026,92	2.819,27
indien onderhoudskost 70 % van benzine		30.397,49		52.349,99	
indien onderhoudskost 60 % van benzine		29.975,49		51.927,99	
indien onderhoudskost 50 % van benzine		29.553,49		51.505,99	
indien onderhoudskost 40 % van benzine		29.131,49		51.083,99	
indien onderhoudskost 30 % van benzine		28.709,49		50.661,99	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	20 EUR/ton CO₂	Tabel 18	
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig			
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)	Brandstofcel	Elektrische motor	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost		0,00	
aandrijving	11.780,00	2.160,00	
brandstoftank	10.350,00	6.500,00	
onderhoud, smeermiddelen en olie	2.954,00	2.954,00	
brandstof	11.700,00	3.217,50	
TOTAAL		53.349,00	31.396,50
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)			
CO ₂	531,18	387,76	
CO (gezondheid + broeikaseffect)	2,36	2,34	
NO _x	39,81	24,68	
SO ₂	215,71	122,96	
PM	152,00	-48,64	
NMVOS	274,95	272,20	
geluidshinder	143,47	143,47	
totale vermeden externe kost		1.359,49	904,77
niet gekwantificeerde meerkost			
beperkte range	80 km tot 120 km		
TOTALE KOST PER VOERTUIG		51.989,51	30.491,73
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		3.999,19	2.345,52

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	9 EUR/ton CO₂	Tabel 19			
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
	Benzine (referentie)	aardgas	aardgas (home compressor)	waterstof verbrandings- motor	
private kosten(inclusief accijnzen)					
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00
brandstoftank	125,00	1.838,00	1.838,00	10.350,00	10.350,00
belasting op inverterstelling	123,00				0,00
verkeersbelasting	2.973,83				0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00		0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00
brandstof	16.263,18	10.237,50	10.237,50	11.700,00	11.700,00
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	0,00	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00
TOTAAL		42.580,00	34.680,50	34.680,50	44.655,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	0,00	54,98	54,98		167,32
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,00	1,13	1,13		0,94
NO _x	0,00	28,66	28,66		-119,43
SO ₂	0,00	161,79	161,79		122,96
PM	0,00	100,32	100,32		45,60
NMVOS	0,00	208,96	208,96		269,45
geluidshinder	0,00	0,00	0,00		0,00
totale vermeden externe kost		0,00	555,84	555,84	486,85
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range			200 km tot 300 km	200 km tot 300 km	
lange tank-/oplaadbeurt				duur tankbeurt 4 tot 8 uur	
TOTALE KOST PER VOERTUIG	42.580,00	34.124,66	34.124,66	44.168,15	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.275,38	2.624,97	2.624,97	3.397,55	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	9 EUR/ton CO₂	Tabel 19			
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
	Biobrandstoffen	Elektrische motor (PM = 70 %)	Hybride voertuigen (batterij van 6 kWh)	Brandstofcellen (met batterij)	
private kosten(inclusief accijnzen)					
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	230,00	0,00	4.400,00		
aandrijving	2.310,00	2.160,00	600,00	11.780,00	
brandstoftank	125,00	6.500,00	125,00	10.350,00	
belasting op inverterstelling					0,00
verkeersbelasting					0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00		0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	2.954,00		2.954,00	
brandstof	16.087,50	3.217,50	10.896,60	11.700,00	
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00	
TOTAAL		35.267,50	27.126,50	28.316,60	49.079,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	101,59	174,49	78,88		174,49
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,80	2,34	2,12		2,34
NO _x	9,95	24,68	24,28		24,68
SO ₂	215,71	122,96	84,13		122,96
PM	53,20	45,60	59,28		45,60
NMVOS	-283,20	272,20	126,48		272,20
geluidshinder	0,00	143,47	0,00		143,47
totale vermeden externe kost		98,06	785,74	375,17	785,74
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range					
lange tank-/oplaadbeurt		beperkte landbouwareaal	80 km tot 120 km		
TOTALE KOST PER VOERTUIG	35.169,44	26.340,76	27.941,43	48.293,26	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.705,34	2.026,21	2.149,34	3.714,87	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	9 EUR/ton CO₂	Tabel 19		
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig				
private kosten(inclusief accijnzen)	LPG	Brandstofcel hernieuwbare bronnen	Elektrische motor (PM = 132 %)	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	2.000,00		0,00	
aandrijving	2.310,00	11.780,00	2.160,00	
brandstoftank	1.625,00	10.350,00	6.500,00	
belasting op inverterstelling	0,00	0,00		
verkeersbelasting	2.973,83	0,00		
extra belasting over hele levensduur	1.365,00	0,00	0,00	
onderhoud + olie en smeermiddelen	5.260,00	2.954,00	2.954,00	
brandstof	9.243,00	11.700,00	3.217,50	
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-800,00	-4.270,00	-4.270,00	
TOTAAL		40.541,83	49.079,00	27.126,50
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)				
CO ₂	16,73	239,03	174,49	
CO (gezondheid + broeikaseffect)	1,25	2,36	2,34	
NO _x	3,98	39,81	24,68	
SO ₂	99,23	215,71	122,96	
PM	48,64	152,00	-48,64	
NMVOS	162,22	274,95	272,20	
geluidshinder	0,00	143,47	143,47	
totale vermeden externe kost		332,05	1.067,34	691,50
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range			80 km tot 120 km	
lange tank-/oplaadbeurt				
TOTALE KOST PER VOERTUIG	40.209,78	48.011,66	26.435,00	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.093,06	3.693,20	2.033,46	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG	20 EUR/ton CO₂	Tabel 19			
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
private kosten(inclusief accijnzen)	Benzine (referentie)	aardgas	aardgas (home compressor)	waterstof verbrandings- motor	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00	
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00	
brandstoftank	125,00	1.838,00	1.838,00	10.350,00	
belasting op inverterstelling	123,00			0,00	
verkeersbelasting	2.973,83			0,00	
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00	
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00	
brandstof	16.263,18	10.237,50	10.237,50	11.700,00	
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	0,00	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00	
TOTAAL		42.580,00	34.680,50	34.680,50	44.655,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	0,00	122,17	122,17	371,83	
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,00	1,13	1,13	0,94	
NO _x	0,00	28,66	28,66	-119,43	
SO ₂	0,00	161,79	161,79	122,96	
PM	0,00	100,32	100,32	45,60	
NMVOS	0,00	208,96	208,96	269,45	
geluidshinder	0,00	0,00	0,00	0,00	
totale vermeden externe kost		0,00	623,03	623,03	691,35
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range		200 km tot 300 km	200 km tot 300 km		
lange tank-/oplaadbeurt			duur tankbeurt 4 tot 8 uur		
TOTALE KOST PER VOERTUIG	42.580,00	34.057,47	34.057,47	43.963,65	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.275,38	2.619,81	2.619,81	3.381,82	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG	20 EUR/ton CO₂		Tabel 19		
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
private kosten(inclusief accijnzen)	Biobrandstoffen	Elektrische motor	Hybride voertuigen	Brandstofcellen	
			(batterij van 6 kWh)	(met batterij)	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	230,00	0,00	4.400,00	0,00	
aandrijving	2.310,00	2.160,00	600,00	11.780,00	
brandstoftank	125,00	6.500,00	125,00	10.350,00	
belasting op inverterstelling				0,00	
verkeersbelasting				0,00	
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00	
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	2.954,00		2.954,00	
brandstof	16.087,50	3.217,50	10.896,60	11.700,00	
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00	
TOTAAL		35.267,50	27.126,50	28.316,60	49.079,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	225,75	387,76	175,29	387,76	
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,80	2,34	2,12	2,34	
NO _x	9,95	24,68	24,28	24,68	
SO ₂	215,71	122,96	84,13	122,96	
PM	53,20	45,60	59,28	45,60	
NMVOS	-283,20	272,20	126,48	272,20	
geluidshinder	0,00	143,47	0,00	143,47	
totale vermeden externe kost		222,22	999,01	471,58	999,01
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range	beperkte landbouwareaal				
lange tank-/oplaadbeurt	80 km tot 120 km				
TOTALE KOST PER VOERTUIG	35.045,28	26.127,49	27.845,02	48.079,99	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.695,79	2.009,81	2.141,92	3.698,46	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG	20 EUR/ton CO₂		Tabel 19		
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
private kosten(inclusief accijnzen)	LPG	Brandstofcel	Elektrische motor		
		hernieuwbare bronnen			
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00		
ombouwkost	2.000,00		0,00		
aandrijving	2.310,00	11.780,00	2.160,00		
brandstoftank	1.625,00	10.350,00	6.500,00		
belasting op inverterstelling	0,00	0,00	0,00		
verkeersbelasting	2.973,83	0,00	0,00		
extra belasting over hele levensduur	1.365,00	0,00	0,00		
onderhoud + olie en smeermiddelen	5.260,00	2.954,00	2.954,00		
brandstof	9.243,00	11.700,00	3.217,50		
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-800,00	-4.270,00	-4.270,00		
TOTAAL		40.541,83	49.079,00	27.126,50	
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	37,18	531,18	387,76		
CO (gezondheid + broeikaseffect)	1,25	2,36	2,34		
NO _x	3,98	39,81	24,68		
SO ₂	99,23	215,71	122,96		
PM	48,64	152,00	-48,64		
NMVOS	162,22	274,95	272,20		
geluidshinder	0,00	143,47	143,47		
totale vermeden externe kost		352,50	1.359,49	904,77	
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range	80 km tot 120 km				
lange tank-/oplaadbeurt					
TOTALE KOST PER VOERTUIG	40.189,32	47.719,51	26.221,73		
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.091,49	3.670,73	2.017,06		

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	benzine met uitstoot van 160,2 g/km		9 EUR/ton CO₂	Tabel 21	
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)	Benzine (referentie)	aardgas	waterstof verbrandings- motor	Biobrandstoffen	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	230,00	
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.310,00	
brandstoftank	125,00	1.838,00	10.350,00	125,00	
onderhoud, smeermiddelen en olie	4.220,00	5.260,00	5.260,00	4.220,00	
brandstof	9.010,52	10.237,50	11.700,00	16.087,50	
TOTAAL		32.230,52	38.950,50	48.925,00	39.537,50
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	0,00	97,00	209,46	143,67	
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,00	1,13	0,94	0,80	
NO _x	0,00	28,66	-119,43	9,95	
SO ₂	0,00	161,79	122,96	215,71	
PM	0,00	100,32	45,60	53,20	
NMVOS	0,00	208,96	269,45	-283,20	
geluidshinder	0,00	0,00	0,00	0,00	
totale vermeden externe kost		0,00	597,86	528,98	140,14
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range	200 km tot 300 km			beperkte landbouwareaal	
TOTALE KOST PER VOERTUIG		32.230,52	38.352,64	48.396,02	39.397,36
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		2.479,27	2.950,20	3.722,77	3.030,57

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	benzine met uitstoot van 160,2 g/km		9 EUR/ton CO₂	Tabel 21	
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig					
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)	Elektrische motor	Hybride voertuigen (batterij van 6 kWh)	Brandstofcellen (met batterij)	LPG	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	0,00	600,00		2.000,00	
aandrijving	2.160,00	4.400,00	11.780,00	2.310,00	
brandstoftank	6.500,00	125,00	10.350,00	1.625,00	
onderhoud, smeermiddelen en olie	2.954,00		2.954,00	5.260,00	
brandstof	3.217,50	6.037,20	11.700,00	9.243,00	
TOTAAL		31.396,50	27.727,20	53.349,00	37.003,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	216,49	112,46	216,49	58,76	
CO (gezondheid + broeikaseffect)	2,34	2,12	2,34	1,25	
NO _x	24,68	24,28	24,68	3,98	
SO ₂	122,96	84,13	122,96	99,23	
PM	45,60	59,28	45,60	48,64	
NMVOS	272,20	126,48	272,20	162,22	
geluidshinder	143,47	0,00	143,47	0,00	
totale vermeden externe kost		827,74	408,75	827,74	374,08
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range	80 km tot 120 km				
TOTALE KOST PER VOERTUIG		30.568,76	27.318,45	52.521,26	36.628,92
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		2.351,44	2.101,42	4.040,10	2.817,61
indien onderhoudskost 70 % van benzine		30.568,76		52.521,26	
indien onderhoudskost 60 % van benzine		30.146,76		52.099,26	
indien onderhoudskost 50 % van benzine		29.724,76		51.677,26	
indien onderhoudskost 40 % van benzine		29.302,76		51.255,26	
indien onderhoudskost 30 % van benzine		28.880,76		50.833,26	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	benzine met uitstoot van 160,2 g/km		9 EUR/ton CO₂	Tabel 21
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig				
	Brandstofcel	Elektrische motor		
private kosten(exclusief BTW - accijnzen)	hernieuwbare bronnen			
basisprijs	16.565,00	16.565,00		
ombouwkost		0,00		
aandrijving	11.780,00	2.160,00		
brandstoftank	10.350,00	6.500,00		
onderhoud, smeermiddelen en olie	2.954,00	2.954,00		
brandstof	11.700,00	3.217,50		
TOTAAL		53.349,00	31.396,50	
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)				
CO ₂	281,15	216,49		
CO (gezondheid + broeikaseffect)	2,36	2,34		
NO _x	39,81	24,68		
SO ₂	215,71	122,96		
PM	152,00	-48,64		
NMVOS	274,95	272,20		
geluidshinder	143,47	143,47		
totale vermeden externe kost		1.109,46	733,50	
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range		80 km tot 120 km		
TOTALE KOST PER VOERTUIG		52.239,54	30.663,00	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR		4.018,43	2.358,69	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG	benzine met uitstoot van 160,2 g/km		9 EUR/ton CO₂	Tabel 21
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig				
	Benzine (referentie)	aardgas	aardgas (home compressor)	waterstof verbrandings- motor
private kosten(inclusief accijnzen)				
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00
brandstoftank	125,00	1.838,00	1.838,00	10.350,00
belasting op inverteerstelling	123,00			0,00
verkeersbelasting	2.973,83			0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00
brandstof	16.263,18	10.237,50	10.237,50	11.700,00
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	0,00	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00
TOTAAL	42.580,00	34.680,50	34.680,50	44.655,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)				
CO ₂	0,00	97,00	97,00	209,46
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,00	1,13	1,13	0,94
NO _x	0,00	28,66	28,66	-119,43
SO ₂	0,00	161,79	161,79	122,96
PM	0,00	100,32	100,32	45,60
NMVOS	0,00	208,96	208,96	269,45
geluidshinder	0,00	0,00	0,00	0,00
totale vermeden externe kost	0,00	597,86	597,86	528,98
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range		200 km tot 300 km	200 km tot 300 km	
lange tank-/oplaadbeurt			duur tankbeurt 4 tot 8 uur	
TOTALE KOST PER VOERTUIG	42.580,00	34.082,64	34.082,64	44.126,02
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.275,38	2.621,74	2.621,74	3.394,31

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG	benzine met uitstoot van 160,2 g/km		9 EUR/ton CO₂	Tabel 21	
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig			bij het referentievoertuig	
	Biobrandstoffen	Elektrische motor	Hybride voertuigen	Brandstofcellen	
private kosten(inclusief accijnzen)			(batterij van 6 kWh)	(met batterij)	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	230,00	0,00	4.400,00		
aandrijving	2.310,00	2.160,00	600,00		11.780,00
brandstoftank	125,00	6.500,00	125,00		10.350,00
belasting op inverkeerstelling					0,00
verkeersbelasting					0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00		0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	2.954,00			2.954,00
brandstof	16.087,50	3.217,50	10.896,60		11.700,00
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-4.270,00	-4.270,00	-4.270,00		-4.270,00
TOTAAL		35.267,50	27.126,50	28.316,60	49.079,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	143,67	216,49	112,46		216,49
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,80	2,34	2,12		2,34
NO _x	9,95	24,68	24,28		24,68
SO ₂	215,71	122,96	84,13		122,96
PM	53,20	45,60	59,28		45,60
NMVOS	-283,20	272,20	126,48		272,20
geluidshinder	0,00	143,47	0,00		143,47
totale vermeden externe kost		140,14	827,74	408,75	827,74
niet gekwantificeerde meerkost	beperkte landbouwareaal				
beperkte range			80 km tot 120 km		
lange tank-/oplaadbeurt					
TOTALE KOST PER VOERTUIG	35.127,36	26.298,76	27.907,85	48.251,26	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.702,10	2.022,98	2.146,76	3.711,64	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG	benzine met uitstoot van 160,2 g/km		9 EUR/ton CO₂	Tabel 21	
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig			bij het referentievoertuig	
	LPG	Brandstofcel	Elektrische motor		
private kosten(inclusief accijnzen)					
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00		
ombouwkost	2.000,00		0,00		
aandrijving	2.310,00	11.780,00	2.160,00		
brandstoftank	1.625,00	10.350,00	6.500,00		
belasting op inverkeerstelling	0,00	0,00			
verkeersbelasting	2.973,83	0,00			
extra belasting over hele levensduur	1.365,00	0,00	0,00		
onderhoud + olie en smeermiddelen	5.260,00	2.954,00	2.954,00		
brandstof	9.243,00	11.700,00	3.217,50		
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-800,00	-4.270,00	-4.270,00		
TOTAAL		40.541,83	49.079,00	27.126,50	
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	58,76	281,15	216,49		
CO (gezondheid + broeikaseffect)	1,25	2,36	2,34		
NO _x	3,98	39,81	24,68		
SO ₂	99,23	215,71	122,96		
PM	48,64	152,00	-48,64		
NMVOS	162,22	274,95	272,20		
geluidshinder	0,00	143,47	143,47		
totale vermeden externe kost		374,08	1.109,46	733,50	
niet gekwantificeerde meerkost	beperkte range				
beperkte range			80 km tot 120 km		
lange tank-/oplaadbeurt					
TOTALE KOST PER VOERTUIG	40.167,75	47.969,54	26.393,00		
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.089,83	3.689,96	2.030,23		

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	Gedifferentieerde belastingvermindering		9 EUR/ton CO₂	Tabel 24	
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig		bij het referentievoertuig	bij het referentievoertuig	
	Benzine (referentie)	aardgas	aardgas	aardgas	waterstof verbrandingsmotor
private kosten(inclusief accijnzen)			(home compressor)		
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00
brandstoftank	125,00	1.838,00	1.838,00	1.838,00	10.350,00
belasting op inverterstelling	123,00				0,00
verkeersbelasting	2.973,83				0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00
brandstof	16.263,18	10.237,50	10.237,50	11.700,00	11.700,00
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	0,00	-4.270,00	-4.270,00	-6.874,70	-6.874,70
TOTAAL		42.580,00	34.680,50	34.680,50	42.050,30
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	0,00	54,98	54,98	167,32	167,32
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,00	1,13	1,13	0,94	0,94
NO _x	0,00	28,66	28,66	-119,43	-119,43
SO ₂	0,00	161,79	161,79	122,96	122,96
PM	0,00	100,32	100,32	45,60	45,60
NMVOS	0,00	208,96	208,96	269,45	269,45
geluidshinder	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
totale vermeden externe kost		0,00	555,84	555,84	486,85
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range		200 km tot 300 km	200 km tot 300 km		
lange tank-/oplaadbeurt			duur tankbeurt 4 tot 8 uur		
TOTALE KOST PER VOERTUIG	42.580,00	34.124,66	34.124,66	41.563,45	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.275,38	2.624,97	2.624,97	3.197,19	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	Gedifferentieerde belastingvermindering		9 EUR/ton CO₂	Tabel 24	
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig		bij het referentievoertuig	bij het referentievoertuig	
	Biobrandstoffen	Elektrische motor	Hybride voertuigen	Brandstofcellen	
private kosten(inclusief accijnzen)		(PM = 70 %)	(batterij van 6 kWh)	(met batterij)	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	230,00	0,00	4.400,00		
aandrijving	2.310,00	2.160,00	600,00	11.780,00	11.780,00
brandstoftank	125,00	6.500,00	125,00	10.350,00	10.350,00
belasting op inverterstelling				0,00	0,00
verkeersbelasting				0,00	0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	2.954,00		2.954,00	2.954,00
brandstof	16.087,50	3.217,50	10.896,60	11.700,00	11.700,00
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-5.350,31	-7.045,50	-4.825,10	-7.045,50	-7.045,50
TOTAAL		34.187,19	24.351,00	27.761,50	46.303,50
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	101,59	174,49	78,88	174,49	174,49
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,80	2,34	2,12	2,34	2,34
NO _x	9,95	24,68	24,28	24,68	24,68
SO ₂	215,71	122,96	84,13	122,96	122,96
PM	53,20	45,60	59,28	45,60	45,60
NMVOS	-283,20	272,20	126,48	272,20	272,20
geluidshinder	0,00	143,47	0,00	143,47	143,47
totale vermeden externe kost		98,06	785,74	375,17	785,74
niet gekwantificeerde meerkost					
beperkte range		beperkte landbouwareaal			
lange tank-/oplaadbeurt		80 km tot 120 km			
TOTALE KOST PER VOERTUIG	34.089,13	23.565,26	27.386,33	45.517,76	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.622,24	1.812,71	2.106,64	3.501,37	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	Gedifferentieerde belastingvermindering		9 EUR/ton CO₂	Tabel 24
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig				
private kosten(inclusief accijnzen)	LPG	Brandstofcel hernieuwbare bronnen	Elektrische motor (PM = 132 %)	
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	2.000,00		0,00	
aandrijving	2.310,00	11.780,00	2.160,00	
brandstoftank	1.625,00	10.350,00	6.500,00	
belasting op inverterstelling	0,00	0,00		
verkeersbelasting	2.973,83	0,00		
extra belasting over hele levensduur	1.365,00	0,00	0,00	
onderhoud + olie en smeermiddelen	5.260,00	2.954,00	2.954,00	
brandstof	9.243,00	11.700,00	3.217,50	
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-800,00	-8.540,00	-7.045,50	
TOTAAL		40.541,83	44.809,00	24.351,00
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)				
CO ₂	16,73	239,03	174,49	
CO (gezondheid + broeikaseffect)	1,25	2,36	2,34	
NO _x	3,98	39,81	24,68	
SO ₂	99,23	215,71	122,96	
PM	48,64	152,00	-48,64	
NMVOS	162,22	274,95	272,20	
geluidshinder	0,00	143,47	143,47	
totale vermeden externe kost		332,05	1.067,34	691,50
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range				80 km tot 120 km
lange tank-/oplaadbeurt				
TOTALE KOST PER VOERTUIG	40.209,78	43.741,66	23.659,50	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.093,06	3.364,74	1.819,96	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG	Gedifferentieerde belastingvermindering		20 EUR/ton CO₂	Tabel 24
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig				
private kosten(inclusief accijnzen)	Benzine (referentie)	aardgas	aardgas (home compressor)	waterstof verbrandings- motor
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00
brandstoftank	125,00	1.838,00	1.838,00	10.350,00
belasting op inverterstelling	123,00			0,00
verkeersbelasting	2.973,83			0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00
brandstof	16.263,18	10.237,50	10.237,50	11.700,00
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	0,00	-4.270,00	-4.270,00	-6.874,70
TOTAAL		42.580,00	34.680,50	34.680,50
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)				
CO ₂	0,00	122,17	122,17	371,83
CO (gezondheid + broeikaseffect)	0,00	1,13	1,13	0,94
NO _x	0,00	28,66	28,66	-119,43
SO ₂	0,00	161,79	161,79	122,96
PM	0,00	100,32	100,32	45,60
NMVOS	0,00	208,96	208,96	269,45
geluidshinder	0,00	0,00	0,00	0,00
totale vermeden externe kost		0,00	623,03	623,03
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range		200 km tot 300 km	200 km tot 300 km	
lange tank-/oplaadbeurt			duur tankbeurt 4 tot 8 uur	
TOTALE KOST PER VOERTUIG	42.580,00	34.057,47	34.057,47	41.358,95
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.275,38	2.619,81	2.619,81	3.181,46

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG De kostenposten die niet zijn opgenomen	Gedifferentieerde belastingvermindering worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig		20 EUR/ton CO ₂	Tabel 24	
	Biobrandstoffen	Elektrische motor	Hybride voertuigen (batterij van 6 kWh)	Brandstofcellen (met batterij)	
private kosten(inclusief accijnzen)					
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	230,00	0,00	4.400,00		
aandrijving	2.310,00	2.160,00	600,00		11.780,00
brandstoftank	125,00	6.500,00	125,00		10.350,00
belasting op inverkeerstelling					0,00
verkeersbelasting					0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00		0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	2.954,00			2.954,00
brandstof	16.087,50	3.217,50	10.896,60		11.700,00
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-5.350,31	-7.045,50	-4.825,10		-7.045,50
TOTAAL		34.187,19	24.351,00	27.761,50	46.303,50
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	225,75	387,76	175,29		387,76
CO (gezondheid + broeikas effect)	0,80	2,34	2,12		2,34
NO _x	9,95	24,68	24,28		24,68
SO ₂	215,71	122,96	84,13		122,96
PM	53,20	45,60	59,28		45,60
NMVOS	-283,20	272,20	126,48		272,20
geluidshinder	0,00	143,47	0,00		143,47
totale vermeden externe kost		222,22	999,01	471,58	999,01
niet gekwantificeerde meerkost	beperkte landbouwareaal				
beperkte range					80 km tot 120 km
lange tank-/oplaadbeurt					
TOTALE KOST PER VOERTUIG	33.964,97	23.351,99	27.289,92		45.304,49
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.612,69	1.796,31	2.099,22		3.484,96

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG De kostenposten die niet zijn opgenomen	Gedifferentieerde belastingvermindering worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig		20 EUR/ton CO ₂	Tabel 24	
	LPG	Brandstofcel hernieuwbare bronnen	Elektrische motor		
private kosten(inclusief accijnzen)					
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00		
ombouwkost	2.000,00		0,00		
aandrijving	2.310,00	11.780,00	2.160,00		
brandstoftank	1.625,00	10.350,00	6.500,00		
belasting op inverkeerstelling	0,00	0,00			
verkeersbelasting	2.973,83	0,00			
extra belasting over hele levensduur	1.365,00	0,00	0,00		
onderhoud + olie en smeermiddelen	5.260,00	2.954,00	2.954,00		
brandstof	9.243,00	11.700,00	3.217,50		
subsidie voor minder uitstoot CO ₂	-800,00	-8.540,00	-7.045,50		
TOTAAL		40.541,83	44.809,00	24.351,00	
vermeden externe kosten (vergeleken met referentievoertuig)					
CO ₂	37,18	531,18	387,76		
CO (gezondheid + broeikas effect)	1,25	2,36	2,34		
NO _x	3,98	39,81	24,68		
SO ₂	99,23	215,71	122,96		
PM	48,64	152,00	-48,64		
NMVOS	162,22	274,95	272,20		
geluidshinder	0,00	143,47	143,47		
totale vermeden externe kost		352,50	1.359,49	904,77	
niet gekwantificeerde meerkost	beperkte range				
beperkte range					80 km tot 120 km
lange tank-/oplaadbeurt					
TOTALE KOST PER VOERTUIG	40.189,32	43.449,51	23.446,23		
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.091,49	3.342,27	1.803,56		

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	Gedifferentieerde belastingvermindering obv alle polluenten			9 EUR/ton CO₂ Tabel 27
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig			
	Benzine (referentie)	aardgas	aardgas (home compressor)	waterstof verbrandingsmotor
private kosten(inclusief accijnzen)				
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00
brandstoftank	125,00	1.838,00	1.838,00	10.350,00
belasting op inverkeerstelling	123,00			0,00
verkeersbelasting	2.973,83			0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00
brandstof	16.263,18	10.237,50	10.237,50	11.700,00
subsidie voor milieuvriendelijkheid	0,00	-4.270,00	-4.270,00	-3.740,52
TOTAAL		42.580,00	34.680,50	34.680,50
				45.184,48
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range		200 km tot 300 km	200 km tot 300 km	
lange tank-/oplaadbeurt			duur tankbeurt 4 tot 8 uur	
TOTALE KOST PER VOERTUIG	42.580,00	34.680,50	34.680,50	45.184,48
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.275,38	2.667,73	2.667,73	3.475,73

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	Gedifferentieerde belastingvermindering obv alle polluenten			9 EUR/ton CO₂ Tabel 27
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig			
	Biobrandstoffen	Elektrische motor (PM = 70 %)	Hybride voertuigen (batterij van 6 kWh)	Brandstofcellen (met batterij)
private kosten(inclusief accijnzen)				
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	230,00	0,00	4.400,00	
aandrijving	2.310,00	2.160,00	600,00	11.780,00
brandstoftank	125,00	6.500,00	125,00	10.350,00
belasting op inverkeerstelling				0,00
verkeersbelasting				0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	2.954,00		2.954,00
brandstof	16.087,50	3.217,50	10.896,60	11.700,00
subsidie voor milieuvriendelijkheid	-751,52	-6.037,78	-2.882,25	-6.037,78
TOTAAL		38.785,98	25.358,72	29.704,35
				47.311,22
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range	beperkte landbouwareaal	80 km tot 120 km		
lange tank-/oplaadbeurt				
TOTALE KOST PER VOERTUIG	38.785,98	25.358,72	29.704,35	47.311,22
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.983,54	1.950,67	2.284,95	3.639,32

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG (EUR)	Gedifferentieerde belastingvermindering obv alle polluenten			9 EUR/ton CO₂ Tabel 27
De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig			
	LPG	Brandstofcel hernieuwbare bronnen	Elektrische motor (PM = 132 %)	
private kosten(inclusief accijnzen)				
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	2.000,00		0,00	
aandrijving	2.310,00	11.780,00	2.160,00	
brandstoftank	1.625,00	10.350,00	6.500,00	
belasting op inverkeerstelling	0,00	0,00		
verkeersbelasting	2.973,83	0,00		
extra belasting over hele levensduur	1.365,00	0,00	0,00	
onderhoud + olie en smeermiddelen	5.260,00	2.954,00	2.954,00	
brandstof	9.243,00	11.700,00	3.217,50	
subsidie voor milieuvriendelijkheid	-2.549,19	-8.198,40	-5.311,88	
TOTAAL		38.792,64	45.150,60	26.084,62
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range			80 km tot 120 km	
lange tank-/oplaadbeurt				
TOTALE KOST PER VOERTUIG	38.792,64	45.150,60	26.084,62	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.984,05	3.473,12	2.006,51	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	Gedifferentieerde belastingvermindering obv alle pollutanten			20 EUR/ton CO ₂ Tabel 27
	Benzine (referentie)	aardgas	aardgas (home compressor)	
private kosten(inclusief accijnzen)				waterstof verbrandings- motor
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	0,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00
aandrijving	2.310,00	2.550,00	2.550,00	2.550,00
brandstoftank	125,00	1.838,00	1.838,00	10.350,00
belasting op inverterstelling	123,00			0,00
verkeersbelasting	2.973,83			0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00	0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	5.260,00	5.260,00	5.260,00
brandstof	16.263,18	10.237,50	10.237,50	11.700,00
subsidie voor milieuvriendelijkheid	0,00	-4.270,00	-4.270,00	-4.739,70
TOTAAL		42.580,00	34.680,50	34.680,50
				44.185,30
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range		200 km tot 300 km	200 km tot 300 km	
lange tank-/oplaadbeurt			duur tankbeurt 4 tot 8 uur	
TOTALE KOST PER VOERTUIG	42.580,00	34.680,50	34.680,50	44.185,30
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	3.275,38	2.667,73	2.667,73	3.398,87

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	Gedifferentieerde belastingvermindering obv alle pollutanten				20 EUR/ton CO ₂ Tabel 27
	Biobrandstoffen	Elektrische motor	Hybride voertuigen (batterij van 6 kWh)	Brandstofcellen (met batterij)	
private kosten(inclusief accijnzen)					
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00	16.565,00
ombouwkost	230,00	0,00	4.400,00		
aandrijving	2.310,00	2.160,00	600,00		11.780,00
brandstoftank	125,00	6.500,00	125,00		10.350,00
belasting op inverterstelling					0,00
verkeersbelasting					0,00
extra belasting over hele levensduur	0,00	0,00	0,00		0,00
onderhoud + olie en smeermiddelen	4.220,00	2.954,00			2.954,00
brandstof	16.087,50	3.217,50	10.896,60		11.700,00
subsidie voor milieuvriendelijkheid	-1.524,39	-6.844,81	-3.232,39		-6.844,81
TOTAAL		38.013,11	24.551,69	29.354,21	46.504,19
niet gekwantificeerde meerkost		beperkte landbouwareaal			
beperkte range		80 km tot 120 km			
lange tank-/oplaadbeurt					
TOTALE KOST PER VOERTUIG	38.013,11	24.551,69	29.354,21	46.504,19	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.924,09	1.888,59	2.258,02	3.577,25	

TOTALE KOSTEN PER VOERTUIG De kostenposten die niet zijn opgenomen worden verondersteld hetzelfde te blijven als bij het referentievoertuig	Gedifferentieerde belastingvermindering obv alle pollutanten			20 EUR/ton CO ₂ Tabel 27
	LPG	Brandstofcel hernieuwbare bronnen	Elektrische motor	
private kosten(inclusief accijnzen)				
basisprijs	16.565,00	16.565,00	16.565,00	
ombouwkost	2.000,00		0,00	
aandrijving	2.310,00	11.780,00	2.160,00	
brandstoftank	1.625,00	10.350,00	6.500,00	
belasting op inverterstelling	0,00	0,00		
verkeersbelasting	2.973,83	0,00		
extra belasting over hele levensduur	1.365,00	0,00	0,00	
onderhoud + olie en smeermiddelen	5.260,00	2.954,00	2.954,00	
brandstof	9.243,00	11.700,00	3.217,50	
subsidie voor milieuvriendelijkheid	-2.416,82	-9.317,14	-6.200,04	
TOTAAL		38.925,01	44.031,86	25.196,46
niet gekwantificeerde meerkost				
beperkte range			80 km tot 120 km	
lange tank-/oplaadbeurt				
TOTAAL	38.925,01	44.031,86	25.196,46	
TOTALE KOST PER VOERTUIG PER JAAR	2.994,23	3.387,07	1.938,19	

Bron: op basis van CONCAWE, EUCAR en JRC, 2006; Van Mierlo et al., 2006; Emis, 2007; JRC, IPTS en ESTO, 2003a en 2003b; brandstofprijzen benzine, diesel, LPG op 27 april 2007; VUB, VITO en CESE, 2005; IEEP, 2005; België, Federale portaalsite, 2007; Heremans, 2007, Pecqueur, 2007

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Nieuwe aandrijfvormen voor auto's. Private en vermeden externe kosten

Richting: **Handelsingenieur**

Jaar: **2007**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Ik ga akkoord,

Tina VERVLOESSEM

Datum: **31.05.2007**