

RIVM-rapport 773002025/2003

**Scenario's voor duurzame energie in
verkeer en vervoer**

Beoordeling op verschillende criteria voor
duurzaamheid

R.M.M. van den Brink

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

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

SUMMARY

Sustainable energy in traffic and transport

Sustainable transport is more than sustainable energy, referring as it does to accessibility, traffic safety, severance, habitat fragmentation and parking problems too. However, this report only focuses on sustainable energy in transport. The building blocks of sustainable energy consist of sustainable energy sources, vehicle technologies and policy instruments. Sustainable energy sources can be divided into three main categories: 1) biomass, 2) fossil fuels combined with CO₂ storage and 3) renewable energy from solar energy/wind/water. These three sustainable energy sources can be converted into several fuels and electricity (energy carriers), which can be used in three main types of engine technologies: 1) internal combustion, 2) fuel-cell electric 3) battery-electric.

In the discussions on sustainable energy, the focal point is often an energy carrier (like hydrogen) or engine technology (like fuel cells). Making hydrogen available on the Dutch market or improving the sales of fuel-cell vehicles will not by definition lead to sustainable energy, since hydrogen can also be produced from fossil fuels like coal or natural gas. Therefore the scope of the sustainable energy discussion should be broadened to the whole well-to-wheel energy chain.

Sustainable energy source, energy carrier and engine technology taken together make up the energy chain. The Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment was interested in knowing which energy chain might form the basis of a sustainable energy supply to the transport sector. Of all the sustainability criteria defined by the Ministry, a reduction in CO₂ of 80% compared to 1990, will probably be the most difficult to meet. For this reason, we dealt firstly with the technical potential of sustainable energy sources to reduce the use of fossil fuels in the long term (2050) by more than 80% compared to 1990.

The technical potential of biomass is first of all determined by the plantation area, which is currently used for agriculture, becoming available for energy crops. This percentage is very uncertain because it is strongly dependent on the nutritional needs of the average world citizen and the average energy yield in 2050. Because some leading studies estimate 10% as being the maximum percentage, we also used this estimate. The real percentage could be higher but could also be even less than 0, where the current plantation area will not be sufficient to satisfy future nutritional needs. Existing forests will not be used for energy production, although we did assume the use of forest residues;

Starting from these boundary conditions, we found biomass alone apparently unable to have enough potential to reduce global CO₂ emissions by more than 80% compared to 1990. Fossil fuels combined with CO₂ storage do have this potential, but only for a limited amount of time. One reason is the limited onshore CO₂ storage capacity, while the other the limited global oil reserves, which are believed to be as much as 200 times the current annual oil use. The first limitation will be taken away if offshore CO₂ storage technologies are implemented. However, it is not clear whether CO₂ storage in oceans is socially achievable and ecologically

safe. The technical potential of renewable sources like solar energy/wind/water to reduce CO₂ emissions is more than sufficient on a global scale. Besides, wind turbines and solar collectors can be placed on arid lands, precluding competition with food production and preventing a threat to biodiversity.

We defined several scenarios on the basis of CO₂ reduction potential, well-to-wheel energy efficiency and technical costs of sustainable energy chains, in which one or more energy chains replace(s) the current energy chain in transport (oil-based fuels and internal combustion engine). All these scenarios reduce global CO₂ emissions by more than 80% compared to 1990. Besides this, we assessed the impact of the scenarios on global land use (for all sectors), emissions other than CO₂ (only for transport), vehicle and fuel costs per kilometre (for passenger cars in the long term) and external safety (only qualitatively).

Emissions other than CO₂

Emissions other than CO₂ can, technically speaking, be reduced by more than 95% compared to 1990. The use of fuel-cell electric or battery-electric vehicles is not necessary for this reduction, because the internal combustion engine too still has a large emission reduction potential.

Land use

The consequence of a shift to sustainable energy will stake a large claim on land where storage of CO₂ is precluded as an option for sustainability. In scenarios where biomass is produced on 10% of current farming lands, land use for energy production is equal to 0.5 billion ha, or 1.6 times the surface area of the European Union. Besides, to reduce CO₂ emissions by 80% compared to 1990, biomass has to be accompanied by renewable energy from solar collectors or wind turbines. Land use for this renewable energy is estimated from 0.1 to 0.7 billion hectares.

Vehicle and fuel costs per passenger car kilometre

The range found for long-term vehicle and fuel costs per passenger car kilometre is large. With optimistic assumptions, the costs per kilometre for sustainable energy chains could be slightly lower than for the reference energy chain ('fossil fuel + combustion engine'), but where assumptions are pessimistic, the costs might come to about twice as much as for the reference energy chain. The difference in costs between sustainable energy chains and the reference energy chain is dominated by differences in vehicle costs (depreciation) and, to a much lesser extent, by differences in fuel costs. It is important to note in these conclusions that we assumed large reductions in the cost price of fuel cells and batteries due to mass production and technological optimisation.

External safety

External safety problems might occur if hydrogen is stored under pressure. The transportation of hydrogen through underground pipelines and the storage of hydrogen outside build-up areas will strongly diminish the external safety problem. Additional research is necessary to quantify the external safety risks involved with high-pressure storage of gaseous hydrogen.

Other means of hydrogen storage (liquefied, metal hydrides) don't cause external safety problems. In general, transportation and underground CO₂ storage are considered to be safe.

Where policy makers regard land use in relation to competition with food production, drinking-water supply and biodiversity, important indicators for sustainability, it would appear fairly obvious to focus in the long term on electricity or hydrogen from solar energy/wind/water. This is because renewable energy has a large potential, and because wind and solar energy can be produced on degraded lands and even in deserts; for this reason, renewable energy will not threaten food production, drinking-water supply and biodiversity. During the time it will take to build up renewable energy production capacity, underground storage of CO₂ will give us the opportunity to realise a reasonable CO₂ emission reduction in the short term. Biomass should also not be precluded in the short term, since a transition to biomass combined with combustion engines for the transport sector is much easier to achieve than a transition to renewable hydrogen combined with fuel cells, for example.

Our report does not pass final judgement on which energy chain(s) should be aimed in the long term and which policy is needed to achieve this/these energy chain(s). The fact is that the socially desirable energy chain is not only dependent on the indicators dealt with in this report. Balancing sustainable energy chains must consist of an assessment of social costs and benefits in comparison to the reference energy chain and this must focus on all sectors. Besides social costs and benefits, the possible impediments of a transition will also have to be taken into account. Impediments are, for example, the social acceptance of biomass production (competition with food production, diminishing biodiversity), CO₂ storage (safety, ecology), the absence in society of the urge to change current fossil fuel use, and the feeling that hydrogen storage is safe on-board vehicles.

VOORWOORD

Dit rapport is het resultaat van een verzoek van de VROM-directies DGM-KvI en DGM-LMV aan het RIVM om het proces van visievorming over duurzame mobiliteit te ondersteunen met feiten en cijfers. In eerste instantie was het de bedoeling dat het RIVM een aantal factsheets zou opleveren met feiten over duurzame mobiliteit. Echter, al snel bleek dat van echte feiten en ‘harde’ cijfers geen sprake is omdat er veel nuances, meningsverschillen en onzekerheden zijn als het gaat over duurzame energie. Om dit alles in kaart te brengen is de bijdrage van het RIVM uitgegroeid tot het voorliggende rapport evenals een uitgebreid, niet gepubliceerd, achtergrondrapport over de effecten van een aantal beleidsinstrumenten en lokale maatregelen.

Ik wil graag de volgende mensen bedanken voor het becommentariëren van dit rapport: Bert van Wee, Jan-Anne Annema en Jacco Farla (RIVM), Eric van den Heuvel en Remco Hoogma (NOVEM), Leo Schlüsser (AVV), Mirjam Harmelink (Ecofys), Richard Smokers en Rudolf Rijkeboer (TNO-WT), Harry Croezen, Jos Dings, Pieter Janse en Bettina Kampman (CE), Barend van Engelenburg en Paul Hofmeijer (VROM) en Monique Hoogwijk (RIVM/UU).

Robert van den Brink
maart 2003

INHOUD

SAMENVATTING	11
1. INLEIDING	17
2. METHODIEK VOOR SCENARIOKEUZE	21
3. POTENTIE VAN DUURZAME ENERGIEBRONNEN	25
3.1 BIOMASSA.....	25
3.1.1 <i>Organische afvalstromen</i>	25
3.1.2 <i>Bruto opbrengst van energieteelt</i>	25
3.1.3 <i>Netto opbrengst van energieteelt en organisch afval</i>	27
3.1.4 <i>Vervanging van aardolie door biomassa in de sector verkeer</i>	29
3.1.5 <i>CO₂-emissiereductie door vervanging aardolie door biomassa</i>	30
3.1.6 <i>Risico's van grootschalige inzet biomassa</i>	31
3.1.7 <i>Conclusies CO₂-reductiepotentieel biomassa</i>	31
3.2 CO ₂ -OPSLAG	32
3.3 ZON/WIND/WATER.....	33
3.4 CONCLUSIES POTENTIEEL AFZONDERLIJKE ENERGIEBRONNEN	35
4. RENDEMENT VAN ENERGIEKETENS	37
5. KOSTEN PER VOERTUIGKILOMETER VAN ENERGIEKETENS	41
5.1 KOSTEN VAN PRODUCTIE EN DISTRIBUTIE VAN ENERGIEDRAGERS	41
5.2 KOSTEN VAN ALTERNATIEVE AANDRIJFLIJN.....	42
5.3 KOSTEN VAN VOERTUIG	44
5.4 SALDO VAN KOSTEN VOOR ENERGIEDRAGERS EN VOERTUIG	45
5.5 CO ₂ -KOSTENEFFECTIVITEIT.....	46
6. SCENARIOKEUZE	49
7. UITWERKING VAN SCENARIO'S	53
7.1 SCENARIO 1A (BIOMASSA / ZON/WIND/WATER + ICEV).....	53
7.2 SCENARIO 1B (BIOMASSA / ZON/WIND/WATER + FCEV / BEV).....	56
7.3 SCENARIO 2A (FOSSIEL MET CO ₂ -OPSLAG + ICEV).....	58
7.4 SCENARIO 2B (FOSSIEL MET CO ₂ -OPSLAG + FCEV/BEV).....	60
7.5 SCENARIO 3 ('WATERSTOFVRIJ').....	61
7.6 SCENARIO 4 (BIOMASSA MET CO ₂ -OPSLAG / FOSSIEL / ZON/WIND/WATER + ICEV).....	62
7.7 SAMENVATTING	63
8. CONCLUSIES	67
9. DISCUSSIE	71
LITERATUUR	73
BIJLAGE 1 VERZENDLIJST	77
BIJLAGE 2 BIOMASSA	81
BIJLAGE 3 CO₂-OPSLAG	91
BIJLAGE 4 ENERGIE UIT ZON, WIND OF WATER	97
BIJLAGE 5 VERBRANDINGSMOTOR-AANDRIJVING	101
BIJLAGE 6 BRANDSTOFCEL-ELEKTRISCHE AANDRIJVING	107
BIJLAGE 7 BATTERIJ-ELEKTRISCHE AANDRIJVING	111

SAMENVATTING

Het Ministerie van VROM heeft het RIVM gevraagd de huidige kennis te inventariseren over bouwstenen om een duurzame energievoorziening binnen de sector verkeer en vervoer te realiseren. Het Ministerie van VROM wil deze informatie gebruiken om een visie te ontwikkelen op duurzame mobiliteit. Dit rapport gaat uitgebreid in op duurzame energie in de sector verkeer en vervoer. Duurzame mobiliteit is echter meer dan alleen het gebruik van duurzame energie maar heeft ook betrekking op bijvoorbeeld bereikbaarheid, doorsnijding en parkeerproblematiek. Aan deze aspecten van duurzame mobiliteit wordt in het voorliggende rapport geen aandacht besteed.

De bouwstenen voor een duurzame energievoorziening bestaan uit duurzame energiebronnen, (nieuwe) voertuigtechnologieën en beleidsinstrumenten. Er kunnen drie duurzame energiebronnen worden onderscheiden die als alternatief kunnen dienen voor fossiele energie, te weten: 1) energie uit biomassa, 2) energie uit fossiele brandstoffen waarbij CO₂-wordt afgevangen en opgeslagen en 3) energie uit zon/wind/water. Deze drie energiebronnen kunnen worden omgezet in vele brandstoffen of elektriciteit (energiedragers). De energiedragers kunnen vervolgens worden gebruikt in drie voertuigtechnologieën, te weten: 1) verbrandingsmotoren (ICEV), 2) brandstofcellen gecombineerd met elektromotoren (FCEV), of 3) batterijen in combinatie met elektromotoren (BEV). Daarnaast kunnen bouwstenen bestaan uit beleidsinstrumenten zoals een emissieheffing of een kilometerheffing. Voor meer informatie over het effect van beleidsmaatregelen en -instrumenten wordt verwezen naar Van den Brink en Annema (2002).

In de discussie over een transitie naar duurzame energie binnen de sector verkeer wordt vaak de aandacht gericht op óf de energiedrager (veelal waterstof) óf de voertuigtechnologie. Het op de markt beschikbaar maken van een bepaalde energiedrager (bijvoorbeeld waterstof) of het realiseren van een doorbraak van bepaalde voertuigtechnologie (bijvoorbeeld de brandstofcel) hoeft echter niet per definitie tot een duurzame energievoorziening te leiden. Methanol bijvoorbeeld kan immers ook worden geproduceerd uit fossiele brandstoffen als kolen of aardgas en brandstofcellen kunnen ook gebruik maken van energiedragers die zijn geproduceerd uit fossiele brandstoffen. In de discussie over een transitie naar duurzame energie zouden energiebron, energiedrager en voertuigtechnologie daarom in onderlinge samenhang moeten worden beschouwd, hetgeen ook in voorliggend rapport zal gebeuren.

Duurzame energiebron, energiedrager en voertuigtechnologie vormen samen een duurzame energieketen. Het Ministerie van VROM wil van het RIVM weten welke duurzame energieketens of combinatie van duurzame energieketens aan de basis kunnen staan van een duurzame energievoorziening binnen de sector verkeer en vervoer. Van de beoordelingscriteria voor duurzame mobiliteit, zoals opgesteld door het Ministerie van VROM, is de vereiste CO₂-emissiereductie op lange termijn (circa 2050) met 80% ten opzichte van 1990 waarschijnlijk het moeilijkst te realiseren. In dit rapport is daarom als eerste een inschatting gedaan van het technisch potentieel op lange termijn van de drie

duurzame energiebronnen om de mondiale CO₂-emissies door fossiel energiegebruik met meer dan 80% te verminderen ten opzichte van 1990. Ditzelfde is gedaan voor alleen de EU-15 of voor West-Europa, afhankelijk van de beschikbaarheid van gegevens.

Het technisch potentieel van biomassa wordt in belangrijke mate bepaald door het percentage landbouwareaal dat in de toekomst kan worden vrijgemaakt voor de teelt van biomassa. Dit percentage blijkt niet eenduidig omdat het sterk afhankelijk is van de voedselbehoefte van de gemiddelde wereldburger en de gemiddelde landbouwopbrengst per hectare in 2050.

Aangezien enkele gezaghebbende studies veronderstellen dat dit percentage maximaal 10% is, is dat in deze studie ook gehanteerd. Het werkelijke percentage kan hoger zijn maar ook negatief (< 0%), ofwel op lange termijn zou het totale landbouwareaal te klein kunnen zijn om voldoende voedsel te produceren. Verder is verondersteld dat bestaande bossen niet worden gebruikt voor biomassaproductie, wel is verondersteld dat afval uit de houtverwerkende industrie wordt aangewend voor energetische doeleinden.

Uitgaande van bovenstaande randvoorwaarden blijkt dat 'biomassa' alleen niet voldoende potentie heeft om de mondiale CO₂-emissies met meer dan 80% te reduceren ten opzichte van 1990. 'Fossiel + CO₂-opslag' heeft dat wel, maar voor een beperkt aantal jaren. Dit ligt niet aan de opslagcapaciteit voor CO₂ want deze is nagenoeg oneindig wanneer opslag in oceanen wordt inbegrepen. Het probleem is dat de voorraden fossiele energie eindig zijn: de huidige inschatting is dat de voorraden gelijk zijn aan circa 200 maal het huidige, jaarlijkse, fossiele energiegebruik. Of CO₂-opslag in oceanen maatschappelijk haalbaar en ecologisch verantwoord is, is vooralsnog onduidelijk. De technische potentie van hernieuwbare energie uit zon, wind of water blijkt op mondiale schaal ruim voldoende om het fossiele energiegebruik volledig te substitueren. Bovendien kunnen windturbines of zonnecollectoren worden geplaatst op onvruchtbare gronden zodat concurrentie met voedselproductie en afwenteling op biodiversiteit zijn uitgesloten.

Ook op EU-schaalniveau blijkt de potentie van biomassa (geproduceerd binnen de EU) te gering om de CO₂-emissies in de de EU met meer dan 80% te verminderen ten opzichte van 1990. Hetzelfde geldt voor CO₂-opslag en productie van hernieuwbare energie uit zon, wind of water. Voor een aanzienlijk grotere EU zal deze conclusie niet verschillen.

Aan de hand van het CO₂-reductiepotentieel, het ketenrendement en de technische kosten van energieketens zijn scenario's opgesteld met een enkele energieketen of een combinatie van energieketens. Uitgangspunt bij het opstellen van deze scenario's was dat met de energieketen(s) de mondiale CO₂-emissies in alle sectoren met meer dan 80% moet kunnen worden verminderd ten opzichte van 1990. Per scenario is vervolgens voor alleen de sector verkeer en vervoer op hoofdlijnen beoordeeld wat het effect is op niet-CO₂-emissies, technische kosten en externe veiligheid. Daarnaast is voor alle sectoren samen het ruimtegebruik voor energievoorziening ingeschat en zijn mogelijke belemmeringen voor transitie in kaart gebracht. De tabel op pagina 15 geeft een overzicht van deze beoordeling.

Niet-CO₂-emissies

De niet-CO₂-emissies door de sector verkeer kunnen op lange termijn technisch gezien met 95% worden teruggedrongen. Voor deze reductie is de toepassing van brandstofcel-elektrische of batterij-elektrische aandrijving niet noodzakelijk omdat ook de emissies uit verbrandingsmotoren door technische verbeteringen met meer dan 95% kunnen worden teruggedrongen ten opzichte van de huidige emissieniveau's. Deze technische verbeteringen moeten natuurlijk wel door bijvoorbeeld emissienormering worden afgedwongen en gaan met kosten gepaard.

Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik ten behoeve van een mondiale verduurzaming van de energievoorziening in alle sectoren is aanzienlijk in het geval de optie CO₂-opslag wordt uitgesloten. In verschillende scenario's is verondersteld dat 10% van het mondiale landbouwareaal wordt gebruikt voor de teelt van biomassa. Dit komt overeen met 0,5 miljard hectare. Dit is gelijk aan 1,6 keer het totale oppervlak van de EU-15 en circa 150 maal het oppervlak van Nederland. Daarnaast is nog eens 0,1 tot 0,2 of 0,4 tot 0,7 miljard hectare nodig voor de productie van elektriciteit uit zonne-energie respectievelijk windenergie. Windturbines en zonnecollectoren kunnen, in tegenstelling tot biomassa, worden geplaatst op onvruchtbare gronden zoals woestijnen waardoor de concurrentie met voedselproductie of de bedreiging van de biodiversiteit uitgesloten zijn. In totaal is dus 0,6 tot 1,2 miljard hectare nodig voor het verminderen van het fossiele energiegebruik in alle sectoren met 80% ten opzichte van het niveau in 1990 indien alleen energie uit biomassa en zon/wind/water wordt gebruikt en geen opslag van CO₂ plaatsvindt.

Kosten per kilometer

De bandbreedte voor de technische kosten per kilometer van alternatieve energieketens voor de lange termijn is groot: in het meest optimistische geval zijn de technische kosten voor alternatieve energieketens iets lager dan of vrijwel gelijk aan de technische kosten van de referentieketen (fossiel + verbrandingsmotoren). In het slechtste geval zijn de kosten voor de duurste energieketen maximaal 120% hoger dan voor de referentieketen. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat bij deze kostenschattingen ervan is uitgegaan dat de kostprijzen van brandstofcellen en accupakketten in de toekomst fors zullen dalen door technologische ontwikkeling en door massaproductie. De meerkosten per kilometer van alternatieve energieketens ten opzichte van de fossiele referentie wordt voornamelijk bepaald door de meerkosten van voertuigtechnologie en in mindere mate door de meerkosten van de energiedrager.

Externe veiligheid

Problemen met externe veiligheid kunnen optreden bij energieketens waarbij gasvormig, onder hoge druk opgeslagen, waterstof als energiedrager wordt toegepast. Het vervoer van waterstof met ondergrondse buisleidingen en de opslag van waterstof buiten de bebouwde kom zullen het probleem waarschijnlijk sterk verminderen. Aanvullend onderzoek is nodig om uitspraken te kunnen doen over de externe veiligheid van gasvormig waterstof als energiedrager in de sector verkeer en vervoer. Andere vormen van waterstofopslag (bijvoorbeeld metaalhydriden, natrium borohydriden of vloeibaar) geven geen externe

veiligheids-problemen. Transport en ondergrondse opslag van CO₂ worden in het algemeen als veilig beschouwd.

Als ruimtegebruik in relatie tot de concurrentie met voedselproductie/drinkwatervoorziening en afwenteling op biodiversiteit door het beleid als belangrijke indicatoren worden aangemerkt voor een keuze tussen energieketens, ligt het voor de hand de aandacht voor de lange termijn te richten op elektriciteit of waterstof uit zon/wind/water. Dit omdat deze energiebron op mondiale schaal een enorm potentieel heeft en omdat windparken of zonnecollectoren op bijvoorbeeld woestijngronden kunnen worden geplaatst en concurrentie met voedselproductie of drinkwatervoorziening of aantasting van biodiversiteit uitgesloten is. In de tijd die het vergt om op grote schaal energie op te wekken uit zonlicht, wind of waterkracht zou de optie 'fossiel + CO₂-opslag' kunnen worden ingezet om op korte termijn al een bepaalde mate van CO₂-emissiereductie te kunnen realiseren. Ook biomassa moet voor de korte termijn niet worden uitgesloten omdat een transitie naar biobrandstoffen (toegepast in verbrandings-motoren) in de sector verkeer, in vergelijking tot een transitie naar bijvoorbeeld energieketens met waterstof als energiedrager of met brandstofcelvoertuigen, relatief eenvoudig is te realiseren.

Het voorliggende rapport geeft geen eendoordeel over welke energieketen(s) in verkeer op lange termijn zou moeten worden nagestreefd en, in aansluiting daarop, welk beleid zou moeten worden gevoerd om deze energieketen(s) in de praktijk te realiseren. De maatschappelijk gewenste energieketen in verkeer en vervoer is van meer afhankelijk dan van de indicatoren behandeld in dit rapport. Zo moet voor een afweging tussen energieketens idealiter worden gekeken naar het totaal van maatschappelijke kosten en baten van een duurzame energieketen ten opzichte van de referentieketen. Daarbij moet niet alleen de sector verkeer en vervoer worden beschouwd maar alle sectoren. Bij deze afweging moeten naast de maatschappelijke kosten en baten van duurzame energieketens ook de mogelijke belemmeringen van de transitie naar die energieketens in ogenschouw worden genomen. Het betreft bijvoorbeeld de maatschappelijk acceptatie van bijvoorbeeld biomassaproductie (concurrentie met voedsel en ruimtegebruik) en CO₂-opslag (veiligheid en ecologie), de door burgers gevoelde noodzaak tot verandering, het gevoel van veiligheid van waterstofopslag aan boord, het verschil in comfort tussen conventionele voertuigen en brandstofcel- en elektrische voertuigen, et cetera.

Het rapport dient daarom uitsluitend als onderbouwing voor de door het Ministerie van VROM te ontwikkelen visie op een duurzame energievoorziening in verkeer en vervoer op lange termijn. Het probleem is echter niet alleen het kennen van de meest gewenste energievoorziening op de lange termijn maar tevens hoe daar te komen. Ofwel, via welke transitiestappen kan tot het gewenste eindbeeld worden gekomen, want 'the pain is in the change'. Er zal tevens moeten worden onderzocht met welke beleidsinstrumenten de verschillende maatschappelijke actoren kunnen worden bewogen zich in te zetten voor de gewenste transitie(stappen) en welke technologische, politieke, maatschappelijke en institutionele belemmeringen daarbij kunnen optreden en hoe die kunnen worden weggenomen.

Beoordeling van scenario's op verschillende duurzaamheidsaspecten, mondiale schaal

duurzame energiebron + energiedrager + voertuigtechnologie ^{a)}	niet-CO ₂ -emissies ^{b)} (alleen V&V)	mondiaal ruimtegebruik ^{c)} (alle sectoren) [mld hectare]	technische kosten per kilometer ^{d)} (alleen V&V) [index]	externe veiligheid	belemmeringen voor transitie (alleen V&V)
biomassa + biobrandstof ^{e)} + ICEV zon/wind/water + waterstof + ICEV	lager	~1	85 / 175 100 / 130	?	- ruimtegebruik biomassa productie - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstof distributie
biomassa + biobrandstof ^{d)} + FCEV biomassa + elektriciteit + BEV zon/wind/water + waterstof + FCEV zon/wind/water + elektriciteit + BEV	veel lager	~1	95 / 220 100 / 160 105 / 150 100 / 145	?	- ruimtegebruik biomassa productie - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstof distributie - kostprijs brandstofcellen/accupakketten
fossiel met CO ₂ -opslag + waterstof + ICEV	lager	0	95 / 115	?	- draagvlak voor CO ₂ -opslag - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstof distributie
fossiel met CO ₂ -opslag + waterstof + FCEV fossiel met CO ₂ -opslag + elektriciteit + BEV	veel lager	0	100 / 140 105 / 150	?	- draagvlak voor CO ₂ -opslag - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstof distributie - kostprijs brandstofcellen/accupakketten
biomassa + biobrandstof ^{e)} + ICEV zon/wind/water + elektriciteit + BEV	lager	~1	85 / 175 100 / 145	?	- ruimtegebruik biomassa productie - kostprijs accupakketten
biomassa met CO ₂ -opslag + waterstof + ICEV aardolie + fossiele brandstof ^{e)} + ICEV zon/wind/water + waterstof + ICEV	lager	~1	? 100 100 / 130	?	- ruimtegebruik biomassa productie - CO ₂ -opslag - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstof distributie

a) ICEV: internal combustion engine vehicle = voertuig met een verbrandingsmotor; FCEV: fuel-cell-electric vehicle = voertuig met brandstofcellen en een elektromotor; BEV: battery-electric vehicle = voertuig met batterijen en een elektromotor;

b) kwalitatieve inschatting van de verandering in emissies door en de externe veiligheid van vervoer ten opzichte van de referentie-energieketen: 'aardolie + fossiele brandstof + ICEV';

c) ruimtegebruik (in miljard hectare) als gevolg van biomassa teelt en/of opwekking van wind- of zonne-energie voor een duurzame energievoorziening **in alle sectoren**;

d) geïndexeerde lage en hoge schatting voor de kosten per kilometer door voertuigafschrijving en brandstofgebruik (exclusief belastingen) voor personenauto's, 'aardolie + fossiele brandstof + ICEV' is op 100 geïndexeerd;

e) bijvoorbeeld ethanol, methanol, waterstof, biodiesel, DME en synthetische benzine/diesel;

f) bijvoorbeeld ethanol, waterstof en synthetische benzine;

g) bijvoorbeeld benzine, diesel en LPG.

1. INLEIDING

De afgelopen twee decennia zijn veel milieuproblemen gerelateerd aan mobiliteit effectief aangepakt, denk aan de emissies van lood en koolmonoxide. Er zijn echter nog steeds enkele hardnekkige milieuproblemen zoals klimaatverandering, verzuring, lokale luchtkwaliteit (met name fijn stof) en geluidhinder. Een deel van de oorzaak van de hardnekkigheid van deze problemen is dat de economie de afgelopen jaren continu is gegroeid waardoor het gebruik van fossiele brandstoffen bleef toenemen. De emissies van CO₂, een van de belangrijkste veroorzakers van klimaatverandering, zijn rechtstreeks gekoppeld aan het gebruik van fossiele brandstoffen. De mondiale vraag naar energie neemt de komende 50 jaar naar verwachting met meer dan een factor twee toe (Raskin, 2002; IIASA/WEC, 1998). Ook in 2050 zal volgens IIASA/WEC (1998) deze primaire energie nog voor 65 tot 80% afkomstig zijn uit fossiele bronnen (incl. uranium). In 1990 was 82% van het mondiale primaire energiegebruik van fossiele oorsprong. Circa 12% van het primaire energiegebruik bestond in 1990 uit biomassa dat, met name in ontwikkelingslanden, voor het overgrote deel direct wordt aangewend voor koken en verwarmen.

Een verdubbeling van het gebruik van fossiele brandstoffen leidt tot een verdubbeling van de antropogene CO₂-emissies terwijl de CO₂-emissies drastisch moeten afnemen om de verdere opwarming van de aarde (broeikaseffect) tot stilstand te brengen of in ieder geval te beperken. In Kyoto heeft de Europese Unie afgesproken dat de totale CO₂-emissies in de EU in 2010 8% lager zullen zijn dan in 1990. Deze reductie is nog maar een fractie van de reductie van 80% die volgens de IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) op middellange termijn nodig is om het broeikaseffect een halt toe te roepen.

De Directie Klimaatverandering en Industrie (KvI) en de Directie Lokale Milieukwaliteit en Milieu (LMV) van het Directoraat-Generaal Milieu van het Ministerie van VROM zijn momenteel samen bezig een visie te ontwikkelen op duurzame mobiliteit. Duurzame mobiliteit is door hen (in willekeurige volgorde) gedefinieerd als (Bouman *et al.*, 2002):

1. 80% reductie van CO₂-emissies ten opzichte van 1990¹;
2. near-zero emissies: 90-95% reductie van niet-CO₂-emissies ten opzichte van 1990;
3. geen afwenteling op andere milieuthema's zoals externe veiligheid;
4. zekerheid van energievoorziening (geen afhankelijkheid van instabiele regio's);
5. instandhouding van biodiversiteit;
6. mobiliteit moet betaalbaar blijven voor laagste inkomensklassen;
7. kwaliteit van de leefomgeving mag niet worden aangetast;
8. voldoen aan ambities voor ruimtelijke kwaliteit;

De directies KvI en LMV hebben het RIVM gevraagd de visie-ontwikkeling te ondersteunen door middel van het aanleveren van feitenkennis over mogelijkheden (bouwstenen) om tot een duurzame energievoorziening voor de sector verkeer te komen. Door VROM-DGM zijn

¹ Deze reductie is volgens het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) noodzakelijk om de opwarming van de aarde op termijn een halt toe te roepen.

verschillende bouwstenen aangereikt. Deze bouwstenen zijn grofweg in te delen in 1) voertuigtechnologieën, 2) primaire duurzame energiebronnen en 3) beleidsmaatregelen.

De voertuigtechnologieën zijn:

- voertuigen met een geoptimaliseerde (zuinige en 'schone') verbrandingsmotor (internal combustion engine vehicles; ICEV's) en hybride aandrijving;
- de brandstofcel-elektrische voertuigen (fuel-cell-electric vehicles; FCEV's);
- batterij-elektrische voertuigen (battery-electric vehicles; BEV's), eventueel elektriciteitsvoorziening via infrastructuur ('bovenleiding').

De primaire duurzame energiebronnen zijn:

- biomassa
- fossiele brandstoffen met CO₂-opslag
- zon/wind/water (evt. aardwarmte)

De beleidsmaatregelen zijn:

- internaliseren externe kosten;
- beïnvloeding rijgedrag;
- variabilisatie van autobelastingen middels kilometerheffing;
- modal shift in personen- en goederenvervoer

Over alle deze afzonderlijke bouwstenen is binnen de beschikbare tijd zoveel mogelijk informatie verzameld. De informatie over energiebronnen en voertuigtechnologieën is te vinden in de bijlagen van dit rapport. Voor informatie over de beleidsmaatregelen wordt verwezen naar Van den Brink en Annema, 2002.

Met name bij het bepalen van de CO₂-emissiereductie van de bouwstenen bleek dat voertuigtechnologieën niet afzonderlijk kunnen worden beoordeeld maar in onderlinge samenhang met primaire duurzame energiebronnen moeten worden beschouwd. Het maakt voor de CO₂-emissiereductie immers uit of de waterstof, die in een brandstofcelvoertuig wordt aangewend, wordt geproduceerd uit kolen of uit windenergie. Een probleem bij het beoordelen van voertuigtechnologieën in samenhang met primaire energiebronnen is dat al negen combinaties mogelijk zijn van voertuigtechnologieën en energiebronnen, maar dat ook nog eens vele mogelijke energiedragers kunnen worden gebruikt om de koppeling te leggen tussen energiebron en voertuigtechnologie. Uit de verschillende primaire duurzame energiebronnen kunnen namelijk een groot aantal energiedragers (brandstoffen of elektriciteit) worden geproduceerd, te weten:

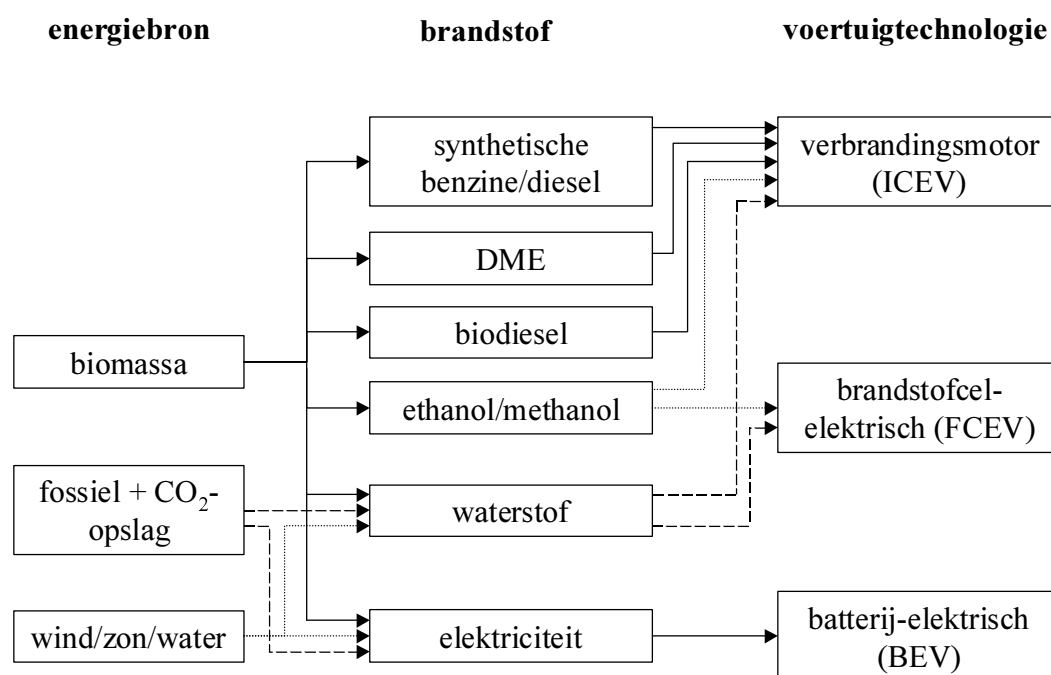
- uit biomassa:
 - ethanol/methanol
 - biodiesel (bijvoorbeeld koolzaadmethylester, KME)
 - DME (dimethylether) of DMM (dimethoxymethaan)
 - waterstof
 - aardgas uit biogas
 - synthetische brandstoffen (Fisher-Tropsch of HTU)
 - elektriciteit
- uit fossiele brandstoffen (aardolie, kolen, aardgas) met CO₂-opslag:
 - elektriciteit
 - waterstof

- uit zon/wind/water:
 - elektriciteit
 - waterstof (via elektriciteit)

Tabel 1 toont de mogelijke combinaties van primaire duurzame energiebron, energiedrager en voertuigtechnologie (energieketens). Figuur 1 geeft de mogelijke combinaties grafisch weer.

Tabel 1 Matrix met alle combinaties van primaire duurzame energiebron, energiedrager en voertuigtechnologie (energieketens)

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire duurzame energiebron	biomassa	ethanol/methanol, biodiesel, DME, DMM, waterstof, FT-benzine/diesel, HTU-diesel, aardgas	synt. benzine, methanol, waterstof	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit



Figuur 1 Grafische weergave van mogelijke energieketens (niet uitputtend)

Uit Tabel 1 en Figuur 1 blijkt dat er in ieder geval minimaal 16 energieketens, combinaties van primaire duurzame energiebron, energiedrager en voertuigtechnologie, mogelijk zijn. Bovendien zijn om duurzaamheid te kunnen bereiken wellicht combinaties van bovenstaande energieketens noodzakelijk. Het uitwerken van alle mogelijke combinaties is echter een onmogelijke zaak. Daarom is een keuze gemaakt uit een beperkt aantal scenario's waarin één of meerdere energieketens worden gecombineerd. Hoofdstuk 2 geeft de methodiek voor de keuze van de scenario's. Hoofdstuk 3 t/m 5 geven de onderbouwing voor de scenariokeuze. Hoofdstuk 6 geeft een overzicht van de gekozen scenario's en in hoofdstuk 7 worden deze scenario's beoordeeld op verschillende duurzaamheidscriteria. Hoofdstuk 8 vat de

belangrijkste conclusies van dit rapport samen en hoofdstuk 9 besluit met een discussie over de resultaten en aanbevelingen voor verder onderzoek. De bijlagen bij dit rapport bevatten uitgebreide achtergrondinformatie over de primaire energiebronnen en voertuigtechnologieën.

Het voorliggende rapport geeft geen oordeel over welk scenario op lange termijn zou moeten worden nagestreefd en, in aansluiting daarop, welk beleid zou moeten worden gevoerd om het scenario in de praktijk te realiseren. Het rapport dient uitsluitend als onderbouwing voor de door het Ministerie van VROM te ontwikkelen visie op hoe duurzame mobiliteit in de toekomst het best zou kunnen worden vormgegeven. Vervolgens zal moeten worden onderzocht hoe de verschillende maatschappelijke actoren kunnen worden bewogen zich in te zetten voor de gewenste transitie en welke technologische, politieke, maatschappelijke en institutionele belemmeringen daarbij kunnen optreden.

2. METHODIEK VOOR SCENARIOKEUZE

In overleg met het Directoraat-Generaal Milieu (DGM) van het Ministerie van VROM is ervoor gekozen om in eerste instantie uit te gaan van scenario's waarin zoveel mogelijk slechts één primaire duurzame energiebron wordt aangewend. Dit omdat extremen in het algemeen de grootte van het speelveld aangeven en omdat discussies over duurzame mobiliteit vaak gaan over de mogelijkheden van afzonderlijke primaire duurzame energiebronnen. Op basis van de gevonden literatuur is allereerst berekend of deze primaire duurzame energiebronnen op lange termijn (2050) afzonderlijk in staat zouden kunnen zijn om de mondiale CO₂-emissies terug te dringen met 80% ten opzichte van het niveau in 1990 (zie hoofdstuk 3). De relatieve reductie in 2050 is nog groter omdat het fossiele energiegebruik tussen 1990 en 2050 toeneemt. Volgens een scenariostudie door IIASA en de World Energy Council (1998) neemt het mondiale primaire energiegebruik tussen 1990 en 2050 met minimaal 60% en maximaal 175% toe, afhankelijk van onder andere de economische groei en de mate van energiebesparing. De verwachte groei van het primair energiegebruik door de sector verkeer en vervoer tussen 1990 en 2050 ligt nog hoger, tussen de 100 en 265% (zie Tabel 2). In voorliggend rapport wordt de middenwaarde uit de IIASA/WEC-studie gebruikt (alle sectoren: 120% groei, sector verkeer en vervoer: 160% groei). Het aandeel van de sector verkeer en vervoer in het primaire energiegebruik stijgt in dit middenscenario van 18% in 1990 tot 21% in 2050.

In 2050 betekent dit dat de mondiale CO₂-emissies zelfs met ruim 90% moeten worden teruggedrongen. De terugdringing van de CO₂-emissies met 90% in 2050 wordt door VROM-DGM het moeilijkst bereikbare criterium geacht van alle duurzaamheidscriteria zoals die door haar zijn gedefinieerd (zie hoofdstuk 1).

Tabel 2 *Energiegebruik in 1990, 2000 en 2050, mondiaal en Europees*

[EJ]	1990	2050		
		laag	midden	hoog
mondiaal				
primair energiegebruik alle sectoren	379	601	837	1048
<i>waarvan fossiel</i>	<i>311</i>	<i>388</i>	<i>650</i>	<i>814</i>
primair energiegebruik sector transport ^{a)}	68	135	176	247
aandeel transport in totaal primair	18%	22%	21%	24%
West-Europa ^{b)}				
primair energiegebruik alle sectoren	61	55	81	100
<i>waarvan fossiel</i>	<i>56</i>	<i>38</i>	<i>67</i>	<i>84</i>
primair energiegebruik sector transport ^{a)}	13	10	16	27
aandeel transport in totaal primair	21%	18%	20%	27%

a) afgeleid uit finaal energiegebruik door vermenigvuldiging met een factor 1,1

b) is analoog verondersteld aan de EU-15

bron: IIASA/WEC (1998)

Een belangrijk uitgangspunt bij de beoordeling van de potentiële CO₂-emissiereductie van een primaire duurzame energiebron is dat ook in andere sectoren dan verkeer en vervoer in 2050 een 80% reductie in CO₂-emissies moet worden bereikt (Bouman *et al.*, 2002). Dit uitgangspunt is in de voorliggende studie geoperationaliseerd door de totale beschikbare

hoeveelheid primaire duurzame energie (bijvoorbeeld biomassa) in 2050 te verdelen over de verschillende sectoren naar rato van hun primaire energiegebruik in 2050. Op mondiale schaal betekent dit concreet dat de sector verkeer en vervoer circa 21% toekomt van de mondiale beschikbare hoeveelheid primaire duurzame energie (IIASA/WEC, 1998). Op niveau van de EU-15 is dit 20% (IIASA/WEC, 1998). Hoofdstuk 3 gaat in op het potentieel van de primaire duurzame energiebronnen.

Wanneer uit deze eerste verkenning blijkt dat een bepaalde primaire duurzame energiebron voldoende potentieel heeft om de mondiale energievoorziening in alle sectoren te verduurzamen, dan is een scenario opgesteld waarin slechts één primaire duurzame energiebron volledig voorziet in de mondiale energievraag. Is dit niet het geval dan zijn primaire duurzame energiebronnen gecombineerd. Aangezien CO₂-opslag niet algemeen als duurzaam wordt gekenmerkt - milieuorganisaties zien CO₂-opslag niet als eindbeeld van duurzaamheid maar als een tussenoplossing om ondertussen andere duurzame energiebronnen tot wasdom te brengen - is in overleg met DGM besloten CO₂-opslag niet te mengen met andere primaire energiebronnen maar in een apart scenario onder te brengen. Dus ongeacht of CO₂-opslag afzonderlijk in staat is om de mondiale CO₂-emissies gedurende een ongelimiteerde periode met meer dan 80% te reduceren ten opzichte van het niveau in 1990.

Een volgende stap in de keuze voor de scenario's is het vaststellen met welke energiedrager en voertuigtechnologie (ICEV, FCEV of BEV) de primaire duurzame energiebron het best zou kunnen worden gecombineerd. Dit is beoordeeld aan de hand van de volgende twee criteria:

- 1) ketenrendement en
- 2) technische kosten per kilometer (voor voertuig en brandstof)

Uitgaande van een primaire duurzame energiebron, bijvoorbeeld biomassa, leidt de energieketen met het hoogste ketenrendement tot de minst grote aanspraak op de primaire energiebron. Ofwel, deze energieketen heeft het minste landbouwareaal nodig om een bepaald percentage van de mondiale CO₂-emissie te vervangen. Een energieketen kan nog zo'n hoog ketenrendement hebben, als de technische kosten van deze energieketen vele malen hoger zijn (en blijven) dan die van de huidige fossiele energieketen, is de kansrijkheid van de alternatieve energieketen in kwestie gering. Omdat personenauto's het grootste aandeel hebben in de CO₂-emissies door de sector verkeer is ervoor gekozen om de energieketens voor wat betreft ketenrendement en technische kosten alleen verder uit te werken voor personenauto's.

Het ketenrendement grijpt in op de potentie van de energieketen, de kosten op de kosten-effectiviteit van de energieketen. Het is aan het beleid een keuze te maken tussen of een goedkope oplossing met een bepaald resultaat of een duurdere oplossing met meer resultaat. Omdat aan die keuze een visie op duurzame mobiliteit ten grondslag ligt en deze studie juist de basis voor die visieontwikkeling moet leggen, is in deze studie geen keuze gemaakt. Van ieder scenario zijn daarom twee subscenario's samengesteld, één subscenario waarin is gekozen voor de goedkoopste energieketen en één subscenario waarin is gekozen voor de

energieketen met het hoogste ketenrendement. Als beide dezelfde energieketen betreffen is geen uitsplitsing gemaakt.

De scenario's die op bovenstaande wijze zijn samengesteld worden vervolgens op hoofdlijnen beoordeeld op enkele van de overige door DGM opgestelde duurzaamheidscriteria, zoals reeds genoemd in hoofdstuk 1, te weten:

- niet-CO₂-emissies door de sector verkeer en vervoer (criterium 2)
- technische kosten per personenautokilometer² (indicator voor criterium 6);
- ruimtegebruik ten behoeve van energievoorziening voor alle sectoren (indicator voor criterium 5);
- externe veiligheid van verkeer en vervoer (indicator voor criterium 3);
- belemmeringen voor transitie.

Het laatste aspect komt niet voor in de lijst met duurzaamheidscriteria zoals opgesteld door DGM maar achten wij wel belangrijk genoeg om in de beoordeling te worden meegenomen. De drie andere duurzaamheidscriteria in de DGM-lijst, te weten 'zekerheid van de energievoorziening (criterium 4)', 'kwaliteit van de leefomgeving mag niet worden aangetast' (criterium 7) en 'voldoen aan ambities voor ruimtelijke kwaliteit' (criterium 8) konden in deze studie niet worden beoordeeld omdat de criteria nog onvoldoende concreet zijn.

Naast technische kosten wordt de kansrijkheid van energieketens natuurlijk door andere factoren bepaald zoals de bereidheid van consumenten en fabrikanten tot veranderingen en door politieke en institutionele belemmeringen. Daarnaast is van belang of een energieketen compleet nieuwe technologie vereist (bijvoorbeeld bio-methanol in brandstofcel) of gebruik maakt van bestaande technologie (bijvoorbeeld bio-methanol in verbrandingsmotoren). In het eerste geval zijn de initiële kosten hoog en zullen pas afnemen bij grootschalige productie van brandstofcellen. Door de hoge initiële kosten van brandstofcellen zal de vraag naar brandstofcellen moeizaam van de grond komen. Ofwel: "the pain is in the change". Al deze aspecten dienen ook te worden meegenomen in toekomstig beleid gericht op het realiseren van een duurzame mobiliteit. In de voorliggende studie wordt er desalniettemin vanuit gegaan dat de transitie naar (een) alternatieve energieketen(s) reeds is bewerkstelligd en de nieuwe technologieën grootschalig geproduceerd worden. Voor meer informatie over de bereidheid van onder andere autofabrikanten, importeurs en oliemaatschappijen om te participeren in de ontwikkeling van verschillende duurzame energieketens wordt verwezen naar Hekkenberg (2002). Voor informatie over politieke en institutionele belemmeringen bij een transitie naar duurzame energieketens, zie Kampman *et al.* (2002).

² kosten van voertuigtechnologie en energiedrager

3. POTENTIE VAN DUURZAME ENERGIEBRONNEN

Dit hoofdstuk gaat in op het technisch potentieel van de drie afzonderlijke duurzame energiebronnen om de mondiale CO₂-emissies te reduceren. Ook wordt het technisch potentieel ingeschat voor het Europese schaalniveau (EU-15). Hierbij is er op verzoek van VROM-DGM van uitgegaan dat de EU volledig in haar eigen energievoorziening voorziet, ofwel geen energie importeert.

3.1 Biomassa

De potentie van biomassa in het vervangen van fossiele brandstoffen wordt allereerst bepaald door de hoeveelheid organisch afval en meststoffen die kan worden aangewend om biobrandstoffen te produceren of bio-elektriciteit op te wekken. Daarnaast wordt de potentie bepaald door de hoeveelheid biomassa die mondiaal of binnen de EU-15 geteeld kan worden ('energieteelt'). Allereerst wordt het potentieel van organisch afval als bron voor biomassa besproken, daarna energieteelt. Paragraaf 3.1 is een samenvatting van de uitgebreidere informatie in Bijlage 2.

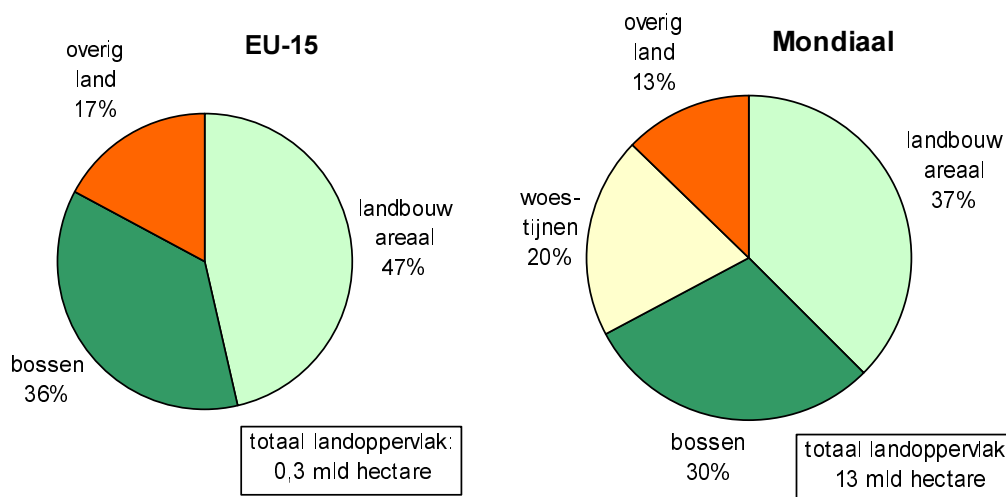
3.1.1 Organische afvalstromen

Organische afvalstromen die kunnen worden aangewend voor de productie van brandstoffen of elektriciteit zijn onder andere residuen uit de voedselteelt (bijvoorbeeld stro bij graanproductie), residuen uit de bosbouw, afvalhout, organische fractie uit huishoudelijk afval, mest en rioolslib. Op basis van de literatuur (zie Bijlage 2) is ingeschat dat de hoeveelheid in 2050 mondiaal beschikbare organisch afvalstoffen en mest een energie-inhoud heeft die overeenkomt met 1-10% van het mondiaal primair energiegebruik. Op EU-schaal is de hoeveelheid beschikbaar organisch afval en mest gelijk aan circa 1-2% van het primair energiegebruik in de EU in 2050.

3.1.2 Bruto opbrengst van energieteelt

De bruto hoeveelheid biomassa die kan worden geproduceerd (energieteelt) is afhankelijk van het voor biomassaproductie beschikbare areaal. Figuur 2 geeft de aandelen weer van de verschillende typen bodemgebruik in het totale mondiale landoppervlak (13 mld hectare). In Figuur 2 is te zien dat het landbouwareaal (akkers en weilanden) circa 35% uitmaakt van het mondiale landoppervlak. Op Europese schaal (EU-15) is dit circa 45%. Het percentage bosareaal is mondiaal gelijk aan circa 30%. In de EU-15 is dit circa 35%.

De belangrijkste beperkingen voor het voor energieteelt beschikbare areaal zijn de concurrentie met voedselproductie en de bedreiging van de biodiversiteit (het voortbestaan van soorten). Omdat binnen de begeleidingsgroep bij deze studie consensus bestond dat het gebruik van bestaande bossen vrijwel zeker een aantasting van de biodiversiteit zal betekenen, wordt in het vervolg van dit rapport verondersteld dat het bosareaal niet kan worden aangewend voor de teelt van biomassa.



Figuur 2 Aandelen van grondgebruik, EU-15 en mondiaal (Faaij et al., 2000a; Armstrong et al., 2002)

De mate waarin de energieteelt concurreert met voedselproductie is sterk afhankelijk van veronderstellingen over 1) de bevolkingsgroei, 2) het toekomstig voedseldieet en 3) de landbouwopbrengst per hectare. Volgens Faaij *et al.* (2000a) zal in 2050, uitgaande van een wereldbevolking van 9,4 miljard mensen, het voor voedselproductie benodigd areaal afhankelijk van het voedseldieet en de toekomstige landbouwopbrengsten, 1 tot 5 miljard hectare bedragen. Dit is 20 tot 100% van het mondiale landbouwareaal. Daarnaast is volgens Faaij *et al.* nog eens 0,4 – 0,8 miljard hectare nodig voor de productie van materialen als papier, hout en karton. Per saldo blijft 0 tot 3,6 miljard hectare over voor energieteelt hetgeen 0 tot 70% van het landbouwareaal vertegenwoordigt. De verwachting door Faaij *et al.* (2000a) is wel dat dit resterende areaal voor een belangrijk deel bestaat uit gedegradeerde landbouwgronden ('uitgeputte' landbouwgronden). Volgens Hall *et al.* (1993) is het mondiale oppervlak van gedegradeerde gronden 2,1 mld hectare, waarvan circa 0,8 mld hectare theoretisch geschikt is voor herbebossing. In GRAIN (Hoogwijk *et al.*, 2000) blijkt uit een uitgebreid literatuuroverzicht dat het wereldwijde areaal dat voor (her)bebossing beschikbaar is 0,4 tot 1,1 mld hectare bedraagt. De opbrengst per hectare op deze gedegradeerde gronden bedraagt echter maar 30 tot 40% van de opbrengst van niet-gedegradeerde landbouwgronden (Menkveld, 2002).

Het is dus moeilijk op voorhand vast te stellen hoeveel procent landbouwareaal in 2050 maximaal ter beschikking zou kunnen staan voor energieteelt. In dit rapport wordt daarom, enigszins arbitrair, verondersteld dat maximaal 10% van het mondiale landbouwareaal (circa 0,5 mld hectare) beschikbaar is voor de energieteelt. Dit is gelijk aan ongeveer 1,6 maal het oppervlak van de EU-15 en 150 maal het oppervlak van Nederland. Het percentage van 10% is ook gehanteerd door de Europese Commissie bij de totstandkoming van het voorstel voor de 'Richtlijn tot bevordering van het gebruik van biobrandstoffen' (Commissie van de Europese Gemeenschappen, 2001). Ook Hall *et al.* (1993) gaan in hun berekeningen van het beschikbare areaal uit van 10% van het landbouwareaal evenals verschillende andere in GRAIN bestudeerde onderzoeken (zie Hoogwijk *et al.*, 2000).

Daarmee is niet zeker dat deze hoeveelheid landbouwareaal op lange termijn inderdaad kan worden aangewend voor biomassateelt zonder dat de voedselproductie in het geding komt of de biodiversiteit wordt aangetast. Verder is het niet uitgesloten dat naast landbouwgronden ook bossen (illegaal) zullen worden aangewend voor productie van biomassa. Of controle op de herkomst van geïmporteerde biomassa mogelijk is en of controles deze praktijk zouden kunnen uitsluiten is onduidelijk.

Gesteld wordt dus dat in 2050 maximaal 10% van het mondiale landbouwareaal (akkers en weilanden) kan worden aangewend voor energieteelt. Verondersteld is verder dat dit areaal vruchtbare ofwel niet-gedegradeerde landbouwgronden betreft. De bruto hoeveelheid geproduceerde biomassa die op dit landbouwareaal kan worden geteeld is gelijk aan circa 40 tot 140 EJ (zie voor de onderbouwing hiervan Bijlage 2). De bandbreedte wordt veroorzaakt door onzekerheden in de opbrengst per hectare, die afhankelijk is van het soort gewas, de vruchtbaarheid van de grond (mineralen en beschikbaarheid van water) en de mate van gebruik van bijproducten. Dit is gelijk aan ongeveer 5 tot 15% van het mondiaal primair energiegebruik in 2050 (circa 840 EJ). De hoge waarde komt overeen met de optimistische waarde voor de teelt van houtachtige biomassa, de lage waarde is de pessimistische waarde voor de teelt van koolzaad. De uitgangspunten van deze berekening staan vermeld in Tabel 3.

Wanneer biomassaproductie alleen tot de EU-15 zou worden beperkt en van het totale landbouwareaal 10% zou worden aangewend voor biomassaproductie, dan is de energie-inhoud van de jaarlijkse bruto biomassa-opbrengst gelijk aan 1 tot 5% van het primaire energiegebruik in 2050 (circa 80 EJ). De reden dat dit aandeel veel lager is, wordt verklaard door het feit dat het aandeel van de EU-15 in het mondiale primaire energiegebruik bijna 10% bedraagt terwijl het aandeel van de EU-15 in het mondiale landbouwareaal 3% bedraagt.

De mate waarin biomassa fossiele energie kan vervangen is niet alleen afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid biomassa maar ook van:

- 1) het energiegebruik dat gepaard gaat met de productie van biomassa (zie paragraaf 3.1.3)
- 2) het energetisch ketenrendement tussen energiebron (biomassa of aardolie) en de plaats waar deze energie wordt ingezet (bijvoorbeeld de wielen van een voertuig) (zie paragraaf 3.1.4).

3.1.3 Netto opbrengst van energieteelt en organisch afval

Allereerst het energiegebruik voor de productie van biomassa. Uit de literatuur blijkt dat voor de productie van houtachtige biomassa per GJ biomassa circa 0,02 - 0,09 GJ aan primaire energie nodig is, waarvan het merendeel dieselbrandstof voor machines betreft. Voor de productie van koolzaad, de grondstof voor biodiesel (koolzaadmethylester, KME), is circa 0,05 - 0,29 GJ primaire energie per GJ biomassa nodig (zie Bijlage 2). Wanneer wordt verondersteld dat de land- en bosbouwmachines, die worden gebruikt voor de productie van biomassa, biobrandstoffen gebruiken, komt netto minder biomassa beschikbaar voor de vervanging van fossiele brandstoffen. Verondersteld is dat het rendement van de omzetting van biomassa naar biobrandstoffen gemiddeld circa 55% (range 30 – 80%) bedraagt (NOVEM, 1999b).

Uitgaande van het gebruik van 10% van het landbouwareaal voor biomassaproductie, komt per hectare netto jaarlijks circa 35-275 GJ biomassa beschikbaar voor de productie van biobrandstoffen of elektriciteit (zie Tabel 3). Voor de mondiale schaal betekent dit circa 15-135 EJ, hetgeen gelijk is aan circa 2 tot 15% van het mondiale primaire energiegebruik in 2050 (840 EJ). Daarnaast komt jaarlijks nog eens circa 10-85 EJ aan biomassa-afval beschikbaar voor de productie van elektriciteit of biobrandstoffen. De totale hoeveelheid biomassa komt daarmee op circa 25-220 EJ en is gelijk aan circa 3-25% van het mondiaal primair energiegebruik in 2050 (zie Tabel 3).

Op West-Europese of EU-schaal betekent dit een jaarlijkse netto hoeveelheid biomassa gelijk aan 2 tot 7% van het primair energiegebruik in de EU-15 in 2050 (zie Tabel 3).

Tabel 3 Uitgangspunten en resultaten van berekening van de maximale biomassa-opbrengst ten behoeve van de productie van elektriciteit of biobrandstoffen

	eenheid	houtachtige biomassa		koolzaad	
		worst	best	worst	best
opbrengst per hectare ^{a)}	ton/hectare	9	17	3	10
bruto opbrengst per hectare ^{a)}	GJ/hectare	162	288	79	213
primair energiegebruik door productie biomassa ^{a)}	GJ/GJ biomassa	0,09	0,02	0,29	0,05
netto opbrengst per hectare	GJ/hectare	133	276	33	192
mondiaal					
beschikbaar areaal	mld hectare	0,5	0,5	0,5	0,5
netto opbrengst energieteelt	EJ	65	134	16	93
<i>t.o.v. totaal primair (~ 840 EJ in 2050)</i>	%	11%	23%	3%	16%
biomassa-afval	EJ	8	84	8	84
netto hoeveelheid biomassa	EJ	73	218	25	177
<i>t.o.v. totaal primair (~ 840 EJ in 2050)</i>	%	9%	26%	3%	21%
West-Europa					
beschikbaar areaal	mld hectare	0,015	0,015	0,015	0,015
netto opbrengst energieteelt	EJ	1,9	4,0	0,5	2,8
<i>t.o.v. totaal primair (~ 80 EJ in 2050)</i>	%	2%	5%	1%	3%
biomassa-afval	EJ	0,8	1,6	0,8	1,6
netto hoeveelheid biomassa	EJ	2,7	5,6	1,3	4,4
<i>t.o.v. totaal primair (~ 80 EJ in 2050)</i>	%	3%	7%	2%	5%

a) zie voor onderbouwing Bijlage 2

Op lange termijn zal de EU zich vermoedelijk uitbreiden tot ongeveer 30 landen. In dat geval zal de verhouding tussen landbouwareaal en totaal primair energiegebruik hoger zijn dan in de huidige EU-15 omdat de nieuwe lidstaten in verhouding tot hun primaire energiegebruik een groot landbouwareaal bezitten. Hierdoor zal in een toekomstige EU-30 een groter percentage van het primaire energiegebruik kunnen worden vervangen door biomassa dan in Tabel 3 vermeld. Dit percentage zal echter, uitgaande van het gebruik van 10% van het landbouwareaal in de EU-30 voor biomassaproductie, nog steeds aanzienlijk lager zijn dan de 90% die uit oogpunt van duurzaamheid moet worden bereikt.

3.1.4 Vervanging van aardolie door biomassa in de sector verkeer

Het potentieel van biomassa in de vervanging van aardolie in de sector verkeer is afhankelijk van de mondiale, netto beschikbare, hoeveelheid biomassa, het rendement van de productie van biobrandstoffen en van de veronderstellingen over de verdeling van deze biomassa over de verschillende sectoren. VROM heeft de ambitie om duurzaamheid niet alleen in de sector verkeer maar ook in alle andere sectoren te realiseren (VROM, 2002). Uit voorgaande paragraaf blijkt al dat mondiaal onvoldoende biomassa beschikbaar is om het fossiele energiegebruik in alle sectoren volledig te substitueren door biomassa. Dit roept de vraag op in welke sector biomassa het best kan worden ingezet. Azar et al. (2001) concluderen dat het uit oogpunt van CO₂- kosteneffectiviteit goedkoper is biomassa in te zetten in de elektriciteits- en warmteproductie dan in de transportsector. Tot dezelfde conclusie komen ook De Jager et al. (1998).

Het antwoord op de vraag in welke sector de beschikbare biomassa het best ingezet zou kunnen worden, wordt echter door meer bepaald dan de kosteneffectiviteit van de inzet van biomassa. Uitgaande van een CO₂-reductie met meer dan 90% in alle sectoren, zou het bijvoorbeeld zo kunnen zijn dat het alternatief voor biomassa in de transportsector duurder is dan het op-één-na goedkoopste alternatief in de elektriciteitsproductie. Per saldo zou het dan toch kosteneffectiever kunnen zijn de biomassa volledig in de transportsector in te zetten. Bovendien speelt mee dat biobrandstoffen door velen als de enige kansrijke mogelijkheid worden gezien om de sector verkeer en vervoer te verduurzamen. Dit omdat biobrandstoffen van alle alternatieven de minst grote transitie vereisen. Biobrandstoffen kunnen immers worden toegepast in minimaal aangepaste verbrandingsmotoren.

Wanneer zou worden verondersteld dat alle potentieel beschikbare biomassa in de sector verkeer en vervoer zou worden toegepast en gebruik wordt gemaakt van verbrandingsmotoren, dan kan 10 tot 70% van het mondiale aardoliegebruik door de sector verkeer worden gesubstitueerd door biobrandstoffen. Op EU-15 schaalniveau is het potentieel van biomassa in dat geval circa 5 tot circa 20%. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat de omzetting van biomassa in biobrandstoffen zoals biodiesel of bio-ethanol een lager rendement heeft dan de omzetting van aardolie in bijvoorbeeld benzine of diesel. Het gemiddelde rendement van de omzetting van biomassa naar biobrandstoffen bedraagt circa 50% terwijl de omzetting van aardolie naar benzine of diesel een rendement heeft van circa 85 tot 90% (NOVEM, 1999b). Andersom kan worden beredeneerd dat voor een 90% substitutie van het aardoliegebruik in de sector verkeer binnen de EU-15, tussen de 50 en 200% van het landbouwooppervlak in de EU-15 nodig is. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de import van biomassa van buiten de EU-15 noodzakelijk is om 90% van het aardoliegebruik in de sector verkeer te substitueren door biomassa.

Brandstofcel-elektrische aandrijvingen (FCEV's) en batterij-elektrische aandrijvingen (BEV's) hebben een hoger rendement dan verbrandingsmotoren (ICEV's). Bij de toepassing van FCEV's of BEV's in plaats van ICEV's kan met biomassa een groter deel van het aardoliegebruik door de sector verkeer worden gesubstitueerd. Hier wordt bij de uitwerking van de scenario's in hoofdstuk 7 verder op ingegaan.

3.1.5 CO₂-emissiereductie door vervanging aardolie door biomassa

Gegeven de mondiale hoeveelheid beschikbare biomassa en veronderstellende dat deze biomassa naar rato van primair energiegebruik in 2050 over de sectoren wordt verdeeld, kan worden afgeleid dat biomassa 2 tot 15% van het aardoliegebruik in de sector verkeer en vervoer zou kunnen vervangen. Daarbij is verondersteld dat de energie die nodig is voor de productie van biomassa wordt gegenereerd uit biomassa met een rendement van circa 50%. De bruto opbrengst aan biomassa is in de berekeningen daarom verminderd met dit energiegebruik. De netto beschikbare biomassa is daarmee volledig CO₂-vrij. Op mondiale schaal kan biomassa de CO₂-emissies in de sector verkeer en vervoer dus met 2 tot 15% verminderen.

Zou in de berekeningen zijn verondersteld dat de energie ten behoeve van de productie van biomassa wordt gegenereerd uit fossiele energie, dan zijn energiedragers geproduceerd uit biomassa niet geheel CO₂-vrij. Op basis van de gegevens in Tabel 3 kan dan worden berekend dat 1 GJ aan biobrandstof (ethanol of biodiesel) in het slechtste geval tot 45% minder CO₂-emissie leidt dan 1 GJ aan fossiele brandstof. In het beste geval is de CO₂-emissie van 1 GJ biobrandstof zelfs 95% lager.

In Tabel 4 is een literatuuroverzicht gegeven van de effecten van biobrandstoffen op de well-to-wheel CO₂-emissies van lichte wegvoertuigen met verbrandingsmotoren. Uit Tabel 4 blijkt dat er grote bandbreedtes zijn voor de vermeden CO₂-emissies als gevolg van het gebruik van biobrandstoffen in interne verbrandingsmotoren. In sommige gevallen is de well-to-wheel CO₂-emissie zelfs negatief, hetgeen betekent dat de producten die uit biomassa worden gemaakt meer fossiele energie besparen dan de fossiele energie die nodig is om de biomassa te telen. Dit is volgens NOVEM (1999b) bijvoorbeeld het geval bij de productie van ethanol uit populieren. Bij de omzetting van populieren komt niet alleen ethanol vrij maar ook groene elektriciteit. Wanneer deze groene elektriciteit grijze (fossiele) elektriciteit vervangt is de netto CO₂-emissie per GJ ethanol volgens NOVEM negatief. Ook bij de productie van Fischer-Tropsch brandstoffen uit eucalyptus is volgens NOVEM de CO₂-emissie per GJ brandstof negatief (zie Tabel 4). In voorliggend rapport wordt er echter van uitgegaan dat de groene elektriciteit wordt toegepast in de sector verkeer (bijvoorbeeld treinen, trams en metro's) en is bij de berekening van het ketenrendement rekening gehouden met het gebruik van bijproducten. De CO₂-emissie per GJ brandstof zal in dat geval per definitie niet negatief kunnen zijn.

De belangrijkste redenen voor de grote bandbreedtes in de verschillende studies in Tabel 4 is de mate van gebruik van fossiele energie in het productieproces van biomassa en de rendementen van de omzetting daarvan in brandstoffen. Daarnaast kan de precieze afbakening (alleen CO₂-emissie van de sector verkeer of van alle sectoren) de verschillen tussen de studies verklaren. Bio-ethanol uit cellulose, biodiesel (KME - koolzaadmethylester) en waterstof uit cellulose leveren vermoedelijk in alle gevallen een reductie van CO₂-emissies op, de twee andere opties kunnen in het slechtste geval leiden tot een toename van CO₂-emissies in vergelijking tot het fossiele alternatief.

Tabel 4 Well-to-wheel CO₂-emissies bij het gebruik van brandstoffen gemaakt uit biomassa in interne verbrandingsmotoren van light-duty voertuigen (benzine = 100)

	De Boo [1993]	IEA/ AFIS [1998]	NOVEM [1999b]	OECD/ IEA [1999]	De Jager <i>et al.</i> [1998]	totale range
methanol uit cellulose	n.d.	20 – 60	10	30 – 110	12 – 19	10 – 110
ethanol uit cellulose	n.d.	15 – 75	-12 – -1	10 – 16	12 – 19	-12 – 75
FT-brandstof uit cellulose ^{a)}	n.d.	n.d.	-8 – -4	n.d.	n.d.	-8 – -4
ethanol uit suiker/zetmeel	70	65 – 130	28	24 – 55	n.d.	24 – 130
biodiesel uit olie. zaden ^{b)}	40	20 – 50	47 – 62	13 – 32	28 – 68	13 – 68
waterstof uit cellulose	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12 – 19 ^{c)}	12 – 19

a) FT = Fischer-Tropsch

b) KME = KoolzaadMethylester

c) waterstofproductie d.m.v. vergassing van hout

De Commissie van de Europese Gemeenschappen (2001) geeft aan dat gemiddeld meer dan de helft van de CO₂-winst verloren gaat tijdens het productieproces van biodiesel en bio-ethanol. Ook Spirinckx en Ceuterick (1997) concluderen dat biodiesel uit koolzaadolie tot een 50% lagere CO₂-emissie leidt dan fossiele diesel.

3.1.6 Risico's van grootschalige inzet biomassa

In het geval een mondiale markt ontstaat voor biomassa, bestaat er een risico dat dit leidt tot het illegaal kappen van bossen. De ecologische kwaliteit van de geïmporteerde biomassa zal daarom moeten worden gecontroleerd.

Een ander risico van een transitie naar biomassa is de concurrentie met voedselvoorziening. Als in bepaalde gebieden energieteelt tot hogere opbrengsten leidt dan voedselteelt is het goed denkbaar dat de voedselvoorziening in die gebieden in de knel komt. Ook kan het gebruik van zoet water voor de teelt van biomassa in met name droge gebieden leiden tot drinkwaterschaarste.

Verder is de continuïteit en betrouwbaarheid van biomassa een mogelijk risico, evenals de stabiliteit van de prijs van biomassa. Grote droogtes of oorlogen in gebieden waar biomassa geteeld zal gaan worden zullen leiden tot schaarste en daardoor prijsstijgingen voor brandstoffen en elektriciteit. Oorlogen en zelfs oorlogsdreiging spelen ook nu een rol in de prijs van ruwe olie.

3.1.7 Conclusies CO₂-reductiepotentieel biomassa

Op basis van voorgaande kan worden geconcludeerd dat zowel op mondiale schaal als in de EU-15 (of EU-30) niet voldoende biomassa kan worden geproduceerd om de CO₂-emissies in alle sectoren met meer dan 90% te verminderen. Wanneer de totale hoeveelheid biomassa volledig in de sector verkeer zou worden ingezet, kan in het meest optimale geval circa 70% van het mondiale aardoliegebruik in de sector verkeer worden vervangen. Het inzetten op grootschalige teelt van biomassa brengt risico's met zich mee zoals illegale houtkap,

bedreiging van de biodiversiteit en concurrentie met de voedsel- en drinkwatervoorziening in met name ontwikkelingslanden.

Als het gaat om de vermindering van de hoeveelheid broeikasgassen moet eigenlijk ook rekening worden gehouden met de tijdens de teelt van biomassa optredende N₂O-emissie, een zeer sterk broeikasgas. Er is een beperkte hoeveelheid literatuur gevonden over de hoeveelheid N₂O-emissies tijdens de teelt van biomassa. Bovendien zijn de gevonden bronnen tegenstrijdig over de mate waarin deze N₂O-emissies de well-to-wheel reductie in broeikasgasemissies verlagen in vergelijking tot de reductie in CO₂-emissies (zie Bijlage 2).

3.2 CO₂-opslag

Er zijn in essentie twee methoden om bij gebruik van fossiele brandstoffen de CO₂-emissies af te vangen. Bij de eerste methode, ‘pre-combustion capture’ genoemd, wordt de fossiele brandstof vergast en gesplitst in bijna puur CO₂ en waterstof (H₂). Deze methode wordt ook wel ontkolen of decarbonisation genoemd. Bij de andere methode, ‘post-combustion capture’ genoemd, wordt de fossiele brandstof in bijvoorbeeld een elektriciteitscentrale verbrand en wordt het CO₂ afgescheiden uit de rookgassen. Dit afvangen kan op verschillende wijzen gebeuren en tussen 85 en 95% van het CO₂ wordt uit het rookgas verwijderd (Hendriks *et al.*, 2002a). De CO₂ moet vervolgens worden gecomprimeerd en getransporteerd naar de locatie waar de CO₂ moet worden opgeslagen. De belangrijkste reservoirs om CO₂ in op te slaan zijn:

- uitgeputte olie- en aardgasvelden
- aquifers
- steenkoollagen
- oceanen

Tabel 5 geeft de bandbreedtes voor de hoeveelheid CO₂ die kan worden opgeslagen in de verschillende reservoirs op verschillende schaalniveau's. Uit Tabel 5 wordt duidelijk dat de mondiale capaciteit voor de opslag van CO₂ voldoende is om gedurende minimaal 200 jaar de jaarlijkse mondiale CO₂-emissie op te slaan. De maximale schatting van de opslagcapaciteit is zelfs gelijk aan 2,5 mln maal de CO₂-emissie in 1990. Wordt de opslag in oceanen buiten beschouwing gelaten dan is de totale capaciteit gelijk aan 18 tot 225 jaar de totale mondiale CO₂-emissie. De eindige voorraden fossiele energie zijn in het geval van opslag in oceanen waarschijnlijk de beperkende factor als het gaat om duurzaamheid. Op EU-schaalniveau is de maximale CO₂-opslagcapaciteit ongeveer gelijk aan maximaal 300 maal de totale CO₂-emissie in de EU in 1990.

Tabel 5 *CO₂-opslagcapaciteit (Gton)*

	mondiaal	Europa (EU)	Nederland
Olie- en gasvelden	446 – 3320	1 – 30	12
Aquifers	30 – 1081	15 – 800	1 – 40
Steenkollagen	0 – 1480	?	8
Oceanen	$5 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^7$	-	-
Totale capaciteit (Gton CO ₂)			
inclusief oceanen	$5 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^7$	-	-
exclusief oceanen	476 – 5880		
CO ₂ -emissie in 1990	26 Gton	2,8 Gton	167 Mton
Totale capaciteit (CO ₂ -emissie in 1990 = 1)			
inclusief oceanen	200 tot ~2,5 mln	-	-
exclusief oceanen	18 tot 225	5 tot ~300	125 tot ~350

Bronnen: Folkert (2000), Hamelinck (2001), Hendriks *et al.* (2002b)

Het ECN heeft in 2001 een inventarisatie gedaan van internationale studies over de huidige en verwachte wereldvoorraden fossiele energiebronnen (in: Algemene Energieraad, 2001). De olievoorraden zijn volgens deze prognoses gelijk aan circa 200 maal het huidige jaarlijkse mondiale olieconsumptie. Voor aardgas en steenkool is dit ook ongeveer 200 jaar. Met andere woorden: zelfs als de opslagcapaciteit van CO₂ oneindig zou zijn, dan zouden bij de huidige en verwachte voorraden fossiele energie binnen circa 200 jaar andere duurzame energiebronnen moeten worden aangesproken.

Bij CO₂-opslag moeten wel enkele kanttekeningen geplaatst worden. Ten eerste wordt CO₂-opslag niet door iedereen als duurzaam gezien. Wel accepteert bijvoorbeeld Greenpeace CO₂-opslag als een tijdelijke maatregel ('eerste hulp voor het klimaat'). Verder is op dit moment onduidelijk in hoeverre CO₂-opslag in oceanen tot verzuring van het zeewater leidt hetgeen gevolgen zal hebben voor levende organismen in oceanen. De risico's van het vrijkomen van grote hoeveelheden (giftig) CO₂ tijdens het transport van CO₂ zijn gering. Ook is de kans klein dat CO₂ op lange termijn gaat lekken uit bijvoorbeeld aardgasvelden omdat het aardgas ook miljoenen jaren in die velden opgesloten heeft gezeten (Folkert, 2000). Recente proefprojecten in Hawaï en Noorwegen om CO₂ in oceanen te injecteren zijn echter door maatschappelijke weerstanden niet uitgevoerd. Meer informatie over CO₂-opslag, onder andere over het energiegebruik van CO₂-opslag evenals over de kosten daarvan, is te vinden in Bijlage 3.

3.3 Zon/wind/water

Het technisch potentieel van windenergie wordt beperkt doordat de gemiddelde windsnelheid niet overal voldoende hoog is om een windturbine rendabel te maken en doordat niet overal windturbines kunnen staan omdat het gebied bijvoorbeeld ontoegankelijk of zeer dicht bevolkt is. Uit onderzoek door een consortium van oliemaatschappijen, automobielfabrikanten en het Duitse Ministerie van Verkeer (VES, 2001) blijkt dat het potentieel van on- en offshore windenergie in Europa circa 10 tot 15% bedraagt van het totale primaire energiegebruik. De UN schat in dat het technisch potentieel van off-shore

windenergie in Europa groter is dan het totale elektriciteitsgebruik in Europa (UNDP, 2000). Het elektriciteitsgebruik in West-Europa bedroeg in 1990 circa 9 EJ (IIASA/WEC, 1998). Het totale primaire energiegebruik in West-Europa in 2050 bedraagt volgens IIASA/WEC (1998) naar schatting 55 tot 100 EJ in 2050. Op Europese schaal is het technisch potentieel van windenergie vermoedelijk niet voldoende om meer dan 90% van het fossiele energiegebruik te vervangen. Op mondiale schaal is het technisch potentieel van onshore en offshore windenergie wel groter dan het mondiale primaire energiegebruik.

Het technisch potentieel van netgekoppelde zonnecollectoren (foto-voltaische systemen) op daken en gevels in Nederland bedraagt volgens ECN/RIVM op lange termijn 30 tot 110 GWp. Dit komt overeen met 10 – 35 Mton CO₂, hetgeen 5 tot 20% van de totale Nederlandse CO₂-emissies in 2000 is. Het potentieel kan natuurlijk worden uitgebreid door ook in de niet-bebouwde omgeving zonnepanelen te plaatsen, bijvoorbeeld langs wegen. In VES (2001) wordt ingeschat dat het potentieel van zonne-energie op Europese schaal circa 20% bedraagt. Op mondiale schaal is de potentie van zonne-energie volgens de UN aanzienlijk groter dan het fossiele energiegebruik (UNDP, 2000).

Het potentieel in Europa van energie uit waterkracht wordt in VES (2001) beperkt geacht, maximaal 2% van het Europese energiegebruik. De UN schat in dat het mondiale technisch potentieel van waterkracht ongeveer gelijk is aan 50 EJ, hetgeen circa 6% van het mondiale primaire energiegebruik in 2050 representeert.

Voordeel van wind- en zonne-energie in vergelijking tot biomassa is dat de vruchtbaarheid van de grond geen rol speelt. Daarmee zijn bijvoorbeeld ook woestijnen in potentie geschikt voor wind- of zonne-energie. Echter, wanneer elektriciteit in woestijnen wordt opgewekt zal elektriciteit over grote afstanden moeten worden gedistribueerd, en dit gaat met grote energieverliezen gepaard. Een ander nadeel van elektriciteit uit zon, wind of water is dat er bijna nooit een perfecte afstemming is tussen aanbod en vraag van elektriciteit zodat elektriciteit veelal tijdelijk moet worden opgeslagen bijvoorbeeld in de vorm van waterstof. Dit gaat met energieverliezen gepaard en zal de kosten van elektriciteit uit wind, zon of waterkracht verhogen.

Per saldo lijkt in de EU-15 het technisch potentieel van elektriciteit uit wind- en zonne-energie en waterkracht niet voldoende om meer dan 90% van het fossiele energiegebruik te substitueren. Dit geldt temeer wanneer deze elektriciteit nog moet omgezet in bijvoorbeeld gecomprimeerde waterstof (rendement circa 65%) om energieverliezen ten gevolge van distributie van energie te beperken en om het aanbod beter op de vraag te kunnen afstemmen.

Op mondiale schaal beschouwd blijkt het technisch potentieel voldoende om meer dan 90% van het primaire energiegebruik te vervangen door duurzame energie opgewekt uit zon/wind/water. Daarnaast is er nog een zeer groot technisch potentieel in de vorm van geothermische energie (aardwarmte) (UNDP, 2000).

Meer informatie over energie uit zon, wind of water is te vinden in Bijlage 4.

3.4 Conclusies potentieel afzonderlijke energiebronnen

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat er mondiaal onvoldoende biomassa kan worden geproduceerd om op lange termijn op mondiale schaal meer dan 90% van het fossiel energiegebruik te substitueren door biomassa. In het meest optimale geval zal deze substitutie pas kunnen worden bereikt indien circa 60% van het mondiaal beschikbare landbouwareaal wordt gebruikt voor de productie van biomassa. Dit zal vrijwel zeker de wereldvoedselvoorziening in gevaar brengen. Binnen de EU-15 is zeker te weinig landbouwareaal beschikbaar om meer dan 90% van het fossiel energiegebruik in de EU-15 te vervangen door biomassa.

Wanneer CO₂-opslag in oceanen wordt inbegrepen, is de mondiale opslagcapaciteit voor CO₂-emissies voldoende om gedurende een zeer lange periode de jaarlijkse mondiale CO₂-emissies op te slaan. Wanneer echter blijkt dat opslag in oceanen niet op een verantwoorde manier kan gebeuren, daalt de totale mondiale opslagcapaciteit naar circa 35 maal de CO₂-emissie in 1990. De CO₂-opslagcapaciteit binnen het grondgebied van de EU-15 is gelijk aan 5 tot 300 maal de CO₂-emissie van alle EU-lidstaten in 1990. Zelfs bij voldoende CO₂-opslagcapaciteit zal de optie fossiel + CO₂-opslag zonder biomassa of zon/wind/water op lange termijn geen zekerheid van energievoorziening kunnen garanderen omdat de mondiale olie-, aardgas- en steenkoolvoorraden naar verwachting binnen minder dan 200 jaar zijn verbruikt. Van alle mondiale aardolievoorraden ligt circa 3% binnen de grenzen van de EU-15, voor aardgas is dit 4% en voor kolen circa 10% (Algemene Energieraad, 2001). De EU-15 kan daarmee maar circa 10 jaar in haar eigen fossiele energiegebruik voorzien.

Het potentieel van zon/wind/water is op Europese schaal niet voldoende om op lange termijn duurzaamheid op Europese schaal te realiseren. Op mondiale schaal is het in potentie wel mogelijk meer dan 90% reductie van het fossiele energiegebruik te realiseren.

Uit voorgaande blijkt dat alleen zon/wind/water op mondiale schaal voldoende potentieel heeft om een duurzame energievoorziening voor alle sectoren te realiseren. Verder blijkt dat de EU-15 niet in staat zal zijn binnen haar eigen grenzen voldoende duurzame energie op te wekken. In het vervolg van dit rapport wordt daarom alleen aandacht besteed aan duurzame energievoorziening op mondiale schaal.

Bij een combinatie van biomassa en bijvoorbeeld zon/wind/water moet worden bekeken in welke sectoren welke primaire energiebronnen het beste kunnen worden ingezet. Het zou bijvoorbeeld kosteneffectiever kunnen zijn om de biomassa voor 100% in te zetten in de energieproductiesector en in de sector verkeer en vervoer waterstof of elektriciteit uit zon/wind/water toe te passen. Er spelen echter nog veel meer aspecten een rol. Een antwoord op bovenstaande vraag vergt daarom verdergaand onderzoek. Bij de uitwerking van de scenario's is daarom uitgegaan van een verdeling van de primaire energiebronnen over de sectoren naar rato van primair energiegebruik in 2050. In de discussie in Hoofdstuk 9 wordt nog wel aandacht besteed aan de vraag in welke sector biomassa toe te passen.

4. RENDEMENT VAN ENERGIEKETENS

In dit hoofdstuk wordt per primaire energiebron onderzocht welke combinatie van voertuigtechnologie en brandstof het hoogste energetisch ketenrendement heeft. Het ketenrendement bepaalt mede de hoeveelheid fossiele energie die de desbetreffende primaire energiebron kan vervangen. Voor het ketenrendement is uitgegaan van de GAVE-studie (NOVEM, 1999b) waarvan in Tabel 6 een overzicht is gegeven.

Tabel 6 Ketenrendement van voertuig en brandstoffen uit GAVE-studie (well-to-wheel)

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	5 – 10%	15 – 20%	~ 30%
	fossiel + CO ₂ -opslag	~ 10%	~ 25%	25 – 30%
	zon/wind/water	~ 10%	~ 30%	30 – 35% ^{a)}
	fossiel	~ 15%		

a) Het ketenrendement van elektriciteit opgewekt uit zon/wind/water gecombineerd met BEV's bedraagt circa 80%. De locaties van elektriciteitsopwekking en –gebruik zijn echter in het algemeen zo ver verwijderd dat elektriciteit moet worden omgezet in waterstof ten behoeve van transport en vervolgens moet worden omgezet (in brandstofcellen) in elektriciteit. Beide omzettingprocessen hebben een rendement van naar schatting 65% hetgeen het ketenrendement op 35% brengt.

bron: NOVEM (1999b)

Uit Tabel 6 blijkt dat voor alle primaire energiebronnen de omzetting naar elektriciteit ten behoeve van BEV's het hoogste ketenrendement oplevert. Ofwel, per eenheid aan de wielen benodigde aandrijfenergie is bij een BEV de minste primaire energie nodig (in de vorm van biomassa, aardolie of schone elektriciteit). Bij een auto met verbrandingsmotor (ICEV) is de meeste primaire energie nodig, ongeacht de primaire energiebron. Dit komt met name omdat de verbrandingsmotor een relatief inefficiënte energie-omzetter is in vergelijking tot een brandstofcel of een elektromotor.

Een belangrijke kanttekening bij de ketenrendement uit Tabel 6 is dat door NOVEM is uitgegaan van het piekrendement van de brandstofcel. Voor een brandstofcelvoertuig op waterstof gaat NOVEM (1999b) uit van een fuel-to-wheel rendement van 46%. Volgens Smokers *et al.* (1999) bedraagt het gemiddelde fuel-to-wheel rendement van een brandstofcelvoertuig op waterstof tijdens een gemiddelde praktijkrit echter op zijn best circa 35% en op zijn slechtst circa 30% (zie Tabel 7). De hoge waarde geldt voor een brandstofcel met piekrendement 60%, de lage waarde voor een brandstofcel met piekrendement 50%. Het lage fuel-to-wheel ketenrendement wordt veroorzaakt doordat het rendement van een brandstofcel, wanneer deze weinig vermogen hoeft te leveren, veel lager is dan het piekrendement (Smokers *et al.*, 1999). Voor een brandstofcelvoertuig op methanol, waarbij dus een reformer moet worden toegepast, bedraagt het fuel-to-wheel ketenrendement volgens Smokers *et al.* (1999) op zijn best circa 30% en op zijn slechtst circa 20%. NOVEM (1999b) gaat uit van circa 35% (zie Tabel 7). Voor het fuel-to-wheel rendement van voertuigen met verbrandingsmotoren hanteert NOVEM (1999b) een waarde van 16 of 17%, afhankelijk van het motortype. Volgens Smokers (1999) geldt een dergelijk rendement echter voor een benzineauto uit 1995. Voor 2005 verwacht TNO dat het rendement van een dieselauto (met directe inspuiting) circa 25% bedraagt en dat van een benzineauto circa 20% (zie Tabel 7).

Aangezien voorliggende studie betrekking heeft op de lange termijn wordt in het vervolg van dit rapport voor ICEV's een fuel-to-wheel rendement van 25% gehanteerd. Voor brandstofcelvoertuigen wordt in het vervolg van dit rapport de door TNO berekende bandbreedte gehanteerd. Het is namelijk zeer twijfelachtig of fabrikanten van brandstofcellen in staat zullen zijn het rendement van brandstofcellen te verbeteren wanneer zij de kostprijs de komende jaren zeer fors willen verlagen om zodoende te kunnen concurreren met verbrandingsmotoren.

Tabel 7 Fuel-to-wheel rendement, GAVE versus TNO (vetgedrukte waarden worden gebruikt bij de verdere berekeningen)

	GAVE (NOVEM, 1999b)	TNO (Smokers <i>et al.</i> , 1999)	
		laag	hoog
ICEV benzine/LPG	16%	16%	20%
ICEV diesel	17%	24%	25%
FCEV op waterstof	46%	30%	36%
FCEV op methanol	33%	21%	28%
BEV	85%	-	-

bron: NOVEM (1999b); Smokers *et al.* (1999)

De TNO-waarden voor het fuel-to-wheel ketenrendement van brandstofcelvoertuigen uit Tabel 7 leiden voor de energieketen biomassa/FCEV tot een well-to-wheel ketenrendement van 10 tot 15%, in plaats van de in Tabel 6 genoemde 20%. Ook de well-to-wheel ketenrendementen van de andere twee energieketens met FCEV's uit Tabel 6 worden bij gebruik van de TNO-waarden voor het fuel-to-tank rendement aanzienlijk lager (zie Tabel 8). Het well-to-wheel rendement van de energieketen biomassa/ICEV wordt bij toepassing van een fuel-to-wheel rendement van 25% gemiddeld 10 tot 15 % en is daarmee vergelijkbaar met het well-to-wheel rendement van biomassa/FCEV. Voor fossiel + CO₂-opslag is er wat betreft ketenrendement nog wel een onderscheid tussen de toepassing van verbrandingsmotoren en brandstofcellen.

Tabel 8 Gecorrigeerde ketenrendement van voertuig en brandstoffen (well-to-wheel)

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	10 – 15%	10 – 15%	~ 30%
	fossiel + CO ₂ -opslag	10 – 15%	15 – 20%	25 – 30%
	zon/wind/water	15 – 20%	20 – 25%	30 – 35%
	fossiel	20 – 25%		

bron: NOVEM (1999b) gecorrigeerd op basis van Smokers *et al.* (1999)

Duidelijk is dat vanuit energetisch oogpunt het gebruik van batterij-elektrische voertuigen (BEV's) de voorkeur geniet. Echter, BEV's gaan ook vandaag de dag efficiënter om met fossiele energie (aardolie/aardgas/kolen) dan ICEV's, en het aandeel van BEV's in de sector verkeer en vervoer is desalniettemin verwaarloosbaar. De reden is dat ook andere aspecten de keuze van de consument/fabrikant voor een bepaalde energieketen beïnvloeden. Het kostenaspect is daarvan vermoedelijk de belangrijkste maar ook actieradius, comfort, mogelijkheden om te tanken/op te laden spelen een rol. In de volgende paragraaf worden de

kosten per voertuigkilometer (uitgaande van toepassing van alternatieve energieketens in personenauto's) van de verschillende energieketens besproken.

5. KOSTEN PER VOERTUIGKILOMETER VAN ENERGIE-KETENS

In dit hoofdstuk wordt op basis van de literatuur een inschatting gedaan van de technische kosten per personenautokilometer. Hierbij is ervan uitgegaan dat de fysieke kenmerken van personenauto's, zoals afmetingen en maximum motorvermogen, niet veranderen ten opzichte van nu (2002). De kosten van een energieketen worden bepaald door:

1. kosten van de productie en distributie van alternatieve energiedragers in vergelijking tot die van benzine of diesel;
2. kosten van alternatieve aandrijflijn in vergelijking met een conventionele verbrandingsmotor;
3. kosten van personenauto's (exclusief aandrijflijn).

De kosten worden in dit hoofdstuk uitgedrukt in US Dollars (USD) omdat nagenoeg alle literatuur waaraan wordt gerefereerd deze valuta hanteren. De USD heeft op dit moment ongeveer een gelijke waarde als de Euro (€) zodat de USD kan worden vervangen door Euro. Alle genoemde kosten zijn exclusief belastingen.

5.1 Kosten van productie en distributie van energiedragers

In Bijlage 2 is een overzicht gegeven van de gevonden literatuur met informatie over de kosten van de productie en distributie van biobrandstoffen/bio-elektriciteit en fossiele brandstoffen. De kosten voor biobrandstoffen/bio-elektriciteit variëren afhankelijk van het type biomassa en energiedrager tussen de 6 en 57 USD/GJ (kale prijs aan de pomp). De bandbreedte wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld verschillen in: 1) de toekomstige prijs van ruwe biomassa (afhankelijk van de herkomst en aard van de biomassa), 2) veronderstelde conversietechniek, 3) de veronderstelde lange-termijnkostenreducties door schaalvergroting en leereffecten, en 4) de kosten voor distributie. Binnen het tijdsbestek van deze studie was het helaas niet mogelijk de geconstateerde verschillen tussen de geciteerde studies te verklaren. Alle in Bijlage 2 geciteerde studies zijn het er over eens dat biobrandstoffen uit cellulose-houdende biomassa (hout of gras) op lange termijn goedkoper zijn dan biobrandstoffen uit oliehoudende zaden of uit zetmeel- of suikerhoudende gewassen (bijvoorbeeld suikerriet, maïs). De laagste waarde in de bandbreedte geldt voor ethanol uit houtachtige biomassa (bijvoorbeeld populieren of eucalyptus), de hoogste waarde voor biodiesel uit sojabonen.

De kosten voor fossiele brandstoffen worden in de GAVE-studie geschat op 6 USD/GJ (NOVEM, 1999b). IEA/AFIS (1998) schat de prijs van benzine op korte termijn in op 9 - 10 USD/GJ, maar schat voor de lange termijn een prijs in van 16-18 USD/GJ (exclusief belastingen). Dit wordt verklaard doordat IEA/AFIS ervan uitgaat dat de prijs van ruwe olie op lange termijn verdubbelt doordat de olieschaarste toeneemt. In de berekeningen wordt daarom uitgegaan van een bandbreedte van 6 - 18 USD/GJ voor de kale prijs van fossiele brandstoffen.

De kosten voor 'fossiel + CO₂-opslag' is onder andere afhankelijk van welke energiedrager wordt geproduceerd. Wanneer CO₂ wordt afgevangen bij een elektriciteitscentrale kost de elektriciteit tussen 14 en 31 €/GJ_e. Wordt fossiele brandstof door middel van vergassing gescheiden in waterstof en CO₂ dan kost de waterstof tussen de 13 en 16 €/GJ. Deze kosten zijn berekend bij de huidige prijs van fossiele energie. In tegenstelling tot aardolie wordt bij fossiel + CO₂-opslag geen toename van de prijs van fossiele brandstof verwacht omdat deze route ook gevoed kan worden door steenkool waarvan de wereldvoorraden veel groter zijn dan van aardolie.

Voor de prijs van elektriciteit of waterstof uit zon/wind/water op lange termijn wordt uitgegaan van windenergie omdat windenergie op dit moment een factor 10 tot 60 goedkoper is dan zonne-energie. De prijs van elektriciteit uit windenergie varieert op dit moment tussen 0,04 en 0,08 USD/kWh (zie Bijlage 4) en tussen 1997 en 2020 wordt een kostprijsreductie van circa 35-45% verwacht (UNDP, 2000). In de berekeningen wordt een bandbreedte gehanteerd van 6 tot 14 USD/GJ. Als gemiddelde waarde wordt het ongewogen gemiddelde genomen. De omzetting van elektriciteit in waterstof ten behoeve van het gebruik in verbrandingsmotoren of brandstofcellen is relatief duur. De meerkosten van de omzetting van duurzame elektriciteit in waterstof bedragen volgens NOVEM (1999b) circa 11 €/GJ waterstof. De prijs van waterstof uit duurzame elektriciteit ligt daarmee tussen 17 en 25 USD/GJ. De ondergrens komt ongeveer overeen met de inschatting van Azar *et al.* (2001).

Tabel 9 Bandbreedte voor kosten van energiedragers (well-to-tank) in USD/GJ energie-inhoud (betreft kale prijzen zonder belastingen)

primaire energiebron	energiedrager	laag	hoog
biomassa	biobrandstoffen/elektriciteit	6	57
fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	13	16
	elektriciteit	14	31
zon/wind/water ^{a)}	waterstof	17	25
	elektriciteit	6	14
fossiel	benzine/diesel/LPG	6	18

a) er is uitgegaan van windenergie, zonne-energie is vooralsnog aanzienlijk duurder
onderbouwing: zie Bijlage 2, 3 en 4

5.2 Kosten van alternatieve aandrijflijn

Tabel 10 geeft de kosten voor de aandrijflijn van ICEV's, FCEV's en BEV's zoals die gehanteerd zijn in de GAVE-studie (NOVEM, 1999b). De meerkosten van de aandrijflijn worden bepaald door de meerkosten van de brandstofcel (FCEV) en de meerkosten van het batterijpakket (FCEV en BEV). Daarnaast heeft GAVE verondersteld dat de brandstofcel en het accupakket van FCEV's iedere 5 jaar moeten worden vervangen en het accupakket van BEV's iedere 4 jaar. De totale investeringskosten van een FCEV en BEV zijn bij een geschatte levensduur van 15 jaar een factor 2 tot bijna 3 hoger dan die van een ICEV.

Tabel 10 Investeringskosten per voertuigtechnologie gedurende een levensduur van 15 jaar volgens GAVE-studie

[1000 USD/ 15 jaar]	voertuig (excl. aandrijflijn)	aandrijflijn	vervanging brandstofcel en/of batterijen	totale kosten	t.o.v. ICEV (index: ICEV=1)
ICEV	14	5 – 7 ^{a)}	n.v.t.	19 – 21	1
FCEV	14	12 – 17 ^{b)}	25 – 27 ^{b)}	42 – 49	2,1 – 2,4
BEV	14	13	36	55	2,7

a) lage waarde: Ottomotor; hoge waarde: Dieselmotor

b) lage waarde: waterstof; hoge waarde: methanol (+ reformer)

bron: GAVE-studie (NOVEM, 1999b), waarbij is uitgegaan van een motorvermogen van 75 kW en een technische levensduur van 15 jaar

Volgens TNO-WT is het echter niet aannemelijk dat in 2050 brandstofcellen gedurende de levensduur van de auto moeten worden vervangen³. Dat accupakketten in 2050 nog tussentijds moeten worden vervangen kan niet worden uitgesloten, echter vervanging iedere vier jaar voor BEV's en iedere vijf jaar voor FCEV's, zoals NOVEM in de GAVE-studie veronderstelt, is vermoedelijk een te pessimistische veronderstelling voor de lange termijn. In de verdere berekeningen wordt daarom verondersteld dat brandstofcellen **niet** behoeven te worden vervangen tijdens de levensduur van het voertuig, en accupakketten niet of maximaal eenmaal tijdens de levensduur.

Tabel 11 geeft een overzicht van de in andere literatuurbronnen aangetroffen meerkosten van FCEV's en BEV's, evenals de gecorrigeerde GAVE-meerkosten. De gevonden literatuur geeft een grote spreiding van de meerkosten te zien. Deze spreiding wordt verklaard door verschillen in de veronderstelde lange-termijn kostenreducties van brandstofcellen en accupakketten en verschillende veronderstellingen omtrent de tussentijdse vervanging van accupakketten.

In de studies die worden gerefereerd in Tabel 11 is rekening gehouden met forse lange-termijnreducties in de kostprijs voor brandstofcellen, reformers en accupakketten ten opzichte van de huidige prijzen. Johansson en Ahman (2002) gaan bijvoorbeeld uit van een kostprijs voor brandstofcellen van 50-100 USD/kW terwijl de huidige prijs 2500-5000 USD/kW bedraagt. Voor de kostprijs van accupakketten gaan Johansson en Ahman (2002) uit van 100-200 USD/kW terwijl de huidige kostprijs 1000 USD/kW bedraagt.

³ Mondelinge mededeling R. Smokers (TNO-WT), 6 januari 2003

Tabel 11 Meerkosten van FCEV's en BEV's ten opzichte van ICEV's

(* 1000 USD)	FCEV (waterstof)	FCEV (methanol/benzine)	BEV
Weiss <i>et al.</i> (2000)	2,5 – 6,5	4,0 – 7,5	7,5 – 11,5
De Jager <i>et al.</i> (1998)	7,0	4,0	-
Faaij <i>et al.</i> (2000b)	0,0 – 4,5	0,5 – 4,5	-
Ogden <i>et al.</i> (1999)	0 – 3,5	0,5 – 4,5	-
Johansson and Ahman (2002)	1,5 – 5,5	1,5 – 6,0	0,0 – 1,0
Azar <i>et al.</i> (2001)	3,5 – 4,0	4,0	-
VES (2001)	3,0	-	-
NOVEM (1999b) ^{a)}	6,0 – 6,5	12,0 – 13,0	7,0 – 16,5
ongewogen gemiddelde	3,0 – 5,0	3,5 – 5,5	5,0 – 9,5

a) betreft een correctie van de oorspronkelijke resultaten uit de GAVE-studie (uitgaande van een motorvermogen van 75 kW): de bovengrens komt overeen met een eenmalige vervanging van accupakketten tijdens de levensduur van het voertuig, voor de ondergrens is verondersteld dat geen tussentijdse vervanging van accupakketten noodzakelijk is, voor zowel onder- als bovengrens is verder verondersteld dat geen tussentijdse vervanging van brandstofcellen nodig is.

5.3 Kosten van voertuig

De uiteindelijke relatieve meerkosten van een personenauto met een alternatieve aandrijflijn zijn naast de kosten voor de alternatieve aandrijflijn ook afhankelijk van de prijs van een personenauto, exclusief de aandrijflijn. In het verleden blijkt dat de prijs van personenauto's, gecorrigeerd voor inflatie, tussen 1981 en 1997 met 40% is gestegen (Van den Brink en Van Wee, 2001). Voor een deel is dit het gevolg van het feit dat er een verschuiving naar grotere auto's heeft plaatsgevonden maar wordt ook verklaard doordat auto's met steeds meer comfort- en veiligheidverhogende accessoires worden uitgerust. Welk deel wordt veroorzaakt door de verschuiving en welk deel door de vergroting is niet bekend. De veronderstelling dat de prijs van personenauto's tussen 2000 en 2050 niet zal toenemen is waarschijnlijk niet erg realistisch en leidt tot een overschatting van de relatieve meerkosten van alternatieve voertuigtechnologie. Wanneer wordt verondersteld dat de prijstoenname in het verleden voor de helft wordt verklaard door de toename van comfort- en veiligheidsverhogende accessoires en deze toename zich in de toekomst doorzet, kan worden afgeleid dat de prijs van personenauto's (exclusief aandrijflijn) tussen 2000 en 2050 met ongeveer 50% toeneemt. Als onderwaarde wordt een prijsstijging van 25% gekozen.

De gemiddelde verkoopprijs van een personenauto met verbrandingsmotor (exclusief belastingen) bedroeg in 1999 circa € 12.000,- (BOVAG-RAI, 2000). Bij een toename van deze kale verkoopprijs met 25 tot 50% tussen 1999 en 2050 ligt de kale verkoopprijs van ICEV's in 2050 tussen de circa € 15.500,- en € 18.500,-.

Tabel 12 Kale verkoopprijs van ICEV's, FCEV's en BEV's

(* 1000 Euro/USD)	ICEV's	FCEV's	BEV's
laag	15,5	18,5 (+20%)	20,0 (+30%)
hoog	18,5	24,0 (+30%)	28,0 (+50%)

5.4 Saldo van kosten voor energiedragers en voertuig

Om het saldo van kosten voor brandstoffen en voertuigen te bepalen is ervan uitgegaan dat FCEV's 20-30% duurder zijn in aanschaf dan ICEV's, en BEV's 30-50% duurder (zie Tabel 11). Voor de kale verkoopprijs (zonder belastingen) van ICEV's wordt uitgegaan van circa € 15.500 tot € 18.500 Euro. Verder is verondersteld dat voertuigen in 15 jaar worden afgeschreven bij een rentepercentage van 4% en dat personenauto's gemiddeld circa 16.000 kilometer per jaar rijden. Verder is het brandstofverbruik van conventionele personenauto's in 2050 gelijk aan circa 4,5 – 5,0 liter/100 km verondersteld. Dit brandstofverbruik is equivalent aan een CO₂-emissie van 120 g/km hetgeen de EU als middenlange termijn doelstelling hanteert voor de gemiddelde CO₂-emissie van nieuwe personenauto's.

Om de kilometerkosten per energieketen te berekenen moet ook rekening worden gehouden met het rendement van het voertuig (fuel-to-wheel). Voor een ICEV is uitgegaan van een fuel-to-wheel rendement van 25%, voor een FCEV van 20-35% (afhankelijk van brandstof en rendement brandstofcel/reformer) en voor een BEV van 85% (NOVEM, 1999b; Smokers *et al.*, 1999). Tabel 13 geeft de technische kosten voor voertuigen en brandstoffen van de verschillende alternatieve energieketens in vergelijking tot die van de referentieketen (ICEV + fossiele brandstof).

Tabel 13 Kosten van energieketens (well-to-wheel) per voertuigkilometer (afgeronde waarden)

(index: fossiele + ICEV = 100)		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energiebron	biomassa	85 – 175	95 – 220	100 – 160
	fossiel + CO ₂ -opslag	95 – 115	100 – 140	105 – 150
	zon/wind/water	100 – 130	105 – 150	100 – 145
	fossiel	100		

Uit Tabel 13 blijkt dat de kosten per kilometer van alle beschouwde energieketens maximaal 120% hoger zijn dan de kosten bij het gebruik van fossiele brandstoffen in verbrandingsmotoren. Bij de voor de alternatieve energieketens meest optimistische veronderstellingen zijn de kosten per kilometer van de meeste alternatieve energieketens gelijk aan of lager dan die van fossiele brandstoffen in verbrandingsmotoren. De kosten van het gebruik van biobrandstoffen in verbrandingsmotoren (ICEV's) zijn 15% lager tot 75% hoger dan de kosten van fossiele brandstoffen in dezelfde verbrandingsmotoren. Ter vergelijking: Johansson (1996) heeft berekend dat de kosten per kilometer van het gebruik van ethanol of methanol uit houtachtige biomassa in ICEV's 5 tot 10% hoger zijn in vergelijking tot fossiele benzine. Uit Tabel 13 blijkt voor wat betreft kosten per kilometer geen duidelijk verschil tussen FCEV's en BEV's. Ook kan niet worden geconcludeerd dat energieketens met biomassa als primaire energiebron goedkoper of juist duurder zijn dan energieketens op basis van de overige twee primaire energiebronnen (fossiel + CO₂-opslag en zon/wind/water).

Een belangrijke kanttekening bij voorgaande conclusies is dat de (verschillen in) technische kosten niet mogen worden verward met maatschappelijke kosten. Het kan bijvoorbeeld best

zo zijn dat BEV's de maatschappij technisch gezien meer kosten maar dat BEV's ook tot maatschappelijke baten leiden, denk aan vermindering broeikaseffect, geluidhinder en verbetering van de lokale luchtkwaliteit (externe effecten). Deze studie doet geen uitspraak over welke alternatieve energieketen de maatschappij als geheel de hoogste baten of laagste kosten oplevert, maar geeft een indicatie over de verschillen in de directe kosten voor automobilititeit.

Volgens Weiss *et al.* (2000) zijn de kosten per kilometer van een brandstofcelauto in 2020 circa 15 tot 20% hoger dan van een conventionele auto. Weiss *et al.* gaan hierbij uit van waterstofproductie uit aardgas (zonder CO₂-opslag). Azar *et al.* (2001) berekenen dat de kilometerkosten van brandstofcelauto's circa 55 tot 60% hoger zijn dan van auto's met een verbrandingsmotor. Deze inschatting stemt ongeveer overeen met de bovengrens in Tabel 13. Azar *et al.* concluderen bovendien dat de kosten per kilometer nauwelijks afhankelijk zijn van welke brandstofceltechnologie wordt toegepast: 1) voertuig tankt waterstof, H₂-opslag aan boord, 2) voertuig tankt methanol, omzetting in waterstof aan boord en 3) voertuig tankt benzine, omzetting in waterstof aan boord. Ogden *et al.* (1999) komen tot dezelfde conclusie. Optie 1 leidt weliswaar tot de laagste kosten voor het voertuig (geen reformer) maar tot de hoogste kosten voor brandstof distributie. Optie 3 leidt tot de hoogste kosten voor het voertuig en de laagste kosten voor brandstofinfrastructuur.

5.5 CO₂-kosteneffectiviteit

Het absolute verschil in de technische kosten per kilometer van alternatieve energieketens ten opzichte van de referentieketen, kan worden omgerekend in een kosteneffectiviteit van CO₂-emissiereductie. Voor deze omrekening wordt ervan uitgegaan dat de CO₂-emissie per voertuigkilometer van de alternatieve energieketens gelijk is aan nul en van de referentieketen gelijk aan 120 g/km. Dit mag alleen worden verondersteld wanneer de energie die nodig is voor bijvoorbeeld CO₂-compressie of het verbouwen van landbouwgewassen ook CO₂-vrije duurzame energie betreft. De berekende kosteneffectiviteit is vermeld in Tabel 14.

Tabel 14 Kosteneffectiviteit van CO₂-emissiereductie voor verschillende energieketens (referentie is het gebruik van uit aardolie vervaardigde brandstoffen in verbrandingsmotoren)

[Euro/ton CO ₂]		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	-160 – +700	-50 – +1120	+10 – +600
	fossiel + CO ₂ -opslag	-70 – +130	+20 – +360	+40 – +480
	zon/wind/water	-10 – +270	+60 – +480	+10 – +420

Tabel 14 laat zeer grote bandbreedtes zien voor de kosteneffectiviteit van alternatieve energieketens en geeft daardoor nauwelijks informatie over verschillen tussen energieketens. Verschillende literatuurbronnen geven kleinere bandbreedtes bijvoorbeeld omdat specifieke ketens binnen hoofdketens worden geanalyseerd. De Jager *et al.* (1998) schatten in dat de CO₂-kosteneffectiviteit van biobrandstoffen in verbrandingsmotoren het hoogst is voor ethanol uit houtachtige biomassa (55 - 130 Euro/ton CO₂). Het laagst is volgens De Jager *et*

al. de kosteneffectiviteit van biodiesel uit oliehoudende biomassa (390 – 950 Euro/ton CO₂). Johansson (1996) schat in dat de kosteneffectiviteit van de toepassing van ethanol uit houtachtige biomassa in verbrandingsmotoren tussen de 220 en 680 USD/ton CO₂ bedraagt.

Hendriks *et al.* (2000a) schatten dat de kosteneffectiviteit van waterstofproductie uit aardgas of kolen met CO₂-opslag in aardgasvelden of steenkoollagen, tussen de 150 en 250 Euro/ton vermeden CO₂-emissie bedraagt (in vergelijking tot directe toepassing van aardgas in het aardgasnet). De productie van elektriciteit uit kolen waarbij de CO₂ deels wordt geleverd aan kassen en deels wordt opgeslagen, blijkt aanzienlijk kosteneffectiever als het gaat om CO₂-emissiereductie, tussen 15 en 30 Euro/ton vermeden CO₂-emissie (in vergelijking tot elektriciteitproductie met de huidige aardgasgestookte elektriciteitscentrales in Nederland).

6. SCENARIOKEUZE

In hoofdstuk 2 is aangegeven dat het eerste uitgangspunt bij de keuze van scenario's is dat een duurzame energiebron afzonderlijk of een combinatie van duurzame energiebronnen in staat moeten zijn om op mondiale schaal de CO₂-emissies door het gebruik van fossiele brandstoffen met 80% te verminderen ten opzichte van 1990. Vervolgens zijn per hoofdscenario twee subscenario's gedefinieerd. In het eerste subscenario is de duurzame energiebron(of -bronnen) gecombineerd met die energiedrager en voertuigtechnologie (= energieketen) waarvoor geldt dat de kosten per voertuigkilometer het laagst zijn (zie hoofdstuk 5). In het tweede subscenario is gekozen voor de energieketen waarvoor geldt dat het ketenrendement het hoogst is (zie hoofdstuk 4).

Uit hoofdstuk 3 bleek dat biomassa zonder hulp van andere duurzame energiebronnen niet in staat blijkt te zijn de mondiale CO₂-emissies door gebruik van fossiele brandstoffen met meer dan 80% te verminderen ten opzichte van 1990. Daarom is ervoor gekozen biomassa te combineren met één van de andere twee duurzame energiebronnen. De keuze is daarbij gevallen op energie uit zon/wind/water omdat over de duurzaamheid van fossiel + CO₂-opslag discussie bestaat en wel om een tweetal redenen: 1) op een bepaald moment in de toekomst zal de CO₂-opslagcapaciteit volledig zijn benut en 2) de voorraden (betaalbare) fossiele energie zijn eindig. De eerste reden vervalt indien CO₂-opslag in oceanen geen negatieve gevolgen zou blijken te hebben voor het leefklimaat in oceanen. Fossiel + CO₂-opslag zou daarmee als niet-duurzaam kunnen worden aangemerkt omdat aan deze vorm van CO₂-vrije energievoorziening op lange termijn een eind komt. CO₂-opslag wordt daarom in een afzonderlijk scenario kwalitatief beoordeeld op de duurzaamheidscriteria zoals genoemd in hoofdstuk 1. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat CO₂-opslag in oceanen geen negatieve gevolgen heeft voor het leefklimaat van oceanen. Samenvattend: er is een scenario met 'biomassa' en 'zon/wind/water' gecombineerd en een scenario met alleen 'fossiel + CO₂-opslag'.

De keuze voor de voertuigtechnologie in de twee subscenario's per hoofdscenario is, zoals eerder genoemd, gestoeld op óf het hoogste ketenrendement óf de laagste technische kosten per kilometer. Het laatste komt overeen met de laagste kosten per vermeden hoeveelheid CO₂, ofwel de hoogste kosteneffectiviteit (zie paragraaf 5.5). Uit Hoofdstuk 4 bleek dat de toepassing van elektriciteit in BEV's in het algemeen tot het hoogste ketenrendement leidt en uit Hoofdstuk 5 bleek dat combinatie van duurzame energiebronnen met ICEV's tot de laagste technische kosten per kilometer leidt. In het eerste sub-scenario wordt daarom uitgegaan van het gebruik van ICEV's omdat dit de goedkoopste voertuigtechnologie blijkt te zijn. In het tweede sub-scenario zou conform de gevolgde methodiek moeten worden uitgegaan van BEV's. Een scenario met alleen BEV's lijkt echter niet erg realistisch gezien de ook in de toekomst beperkte actieradius van BEV's ten opzichte van ICEV's en FCEV's en daarmee de beperkte toepassingsmogelijkheden van BEV's. Daarom wordt in het tweede subscenario uitgegaan van een combinatie van FCEV's en BEV's.

In de discussie over duurzame mobiliteit wordt veelal of uitgegaan van het gebruik van biobrandstoffen of van het gebruik van fossiele brandstoffen met CO₂-opslag. In beide gevallen wordt netto geen CO₂ aan de atmosfeer toegevoegd. Wanneer het gebruik van biobrandstoffen wordt gecombineerd met CO₂-opslag zal netto CO₂ aan de atmosfeer worden onttrokken. In het geval de ambitie is om de CO₂-emissie met 90% terug te brengen zou in dit geval ruimte zijn om naast biobrandstoffen ook fossiele brandstoffen binnen verkeer en vervoer te blijven inzetten. Dit zou bijvoorbeeld in de luchtvaart erg praktisch zijn omdat alternatieven in deze sector technisch gezien nogal ingewikkeld zijn. De kosten van CO₂-opslag moeten idealiter dan wel toegerekend worden aan fossiele brandstoffen (eventueel via verhandelbare emissierechten). Daarom is scenario 3 toegevoegd waarin de combinatie van biomassa en CO₂-opslag is uitgewerkt.

Naar aanleiding van de huidige problemen met externe veiligheid van het gebruik van LPG, bleek in de begeleidingsgroep bij deze studie de behoefte te bestaan aan een waterstofvrij scenario. Scenario 4 veronderstelt daarom een combinatie van biomassa met ICEV's, aangevuld met BEV's gevoed door uit zon/wind/water opgewekte elektriciteit.

De volgende scenario's worden dus uitgewerkt:

Scenario 1a (biomassa / zon/wind/water + ICEV)

- biobrandstof uit biomassa (maximale hoeveelheid op mondiale of schaal), toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasbehandeling en hybride aandrijving;
- aangevuld met waterstof geproduceerd uit zon/wind/water, toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasbehandeling en hybride aandrijving.

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Scenario 1b (biomassa / zon/wind/water + FCEV / BEV)

- methanol, waterstof of synthetische benzine uit biomassa (maximale hoeveelheid op mondiale schaal), toepassing in FCEV's of elektriciteit uit biomassa, toepassing in BEV's eventueel aangevuld met voeding via infrastructuur ('bovenleiding');
- aangevuld met waterstof/elektriciteit geproduceerd uit zon/wind/water, toepassing in FCEV's/BEV's eventueel aangevuld met voeding via infrastructuur ('bovenleiding').

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Scenario 2a (fossiel met CO₂-opslag + ICEV)

- waterstof uit fossiele brandstoffen en CO₂-opslag, toepassing in zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving.

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Scenario 2b (fossiel met CO₂-opslag + FCEV / BEV)

- waterstof uit fossiele brandstoffen en CO₂-opslag, toepassing in FCEV's;
- elektriciteit uit fossiele brandstoffen en CO₂-opslag; toepassing in BEV's eventueel aangevuld met voeding via infrastructuur ('bovenleiding').

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Scenario 3 ('waterstofvrij')

- ethanol/biodiesel uit biomassa (maximale hoeveelheid op mondiale schaal), toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving;
- aangevuld met elektriciteit geproduceerd uit zon/wind/water, toepassing in BEV's eventueel aangevuld met voeding via infrastructuur ('bovenleiding').

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Scenario 4 (biomassa met CO₂-opslag / fossiel / zon/wind/water + ICEV)

- waterstof uit biomassa (maximale hoeveelheid op mondiale schaal) en CO₂-opslag, toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving;
- aangevuld met een aan de opgeslagen hoeveelheid CO₂-emissies equivalente hoeveelheid fossiele brandstoffen in ICEV's, toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving;
- resterende CO₂-emissiereductie door toepassing van waterstof uit zon/wind/water in ICEV's.

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa + CO ₂ -opslag	waterstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel	benzine/diesel/LPG	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

De bovenstaande scenario's representeren de extremen in de discussie over duurzame energievoorziening. De toekomstige praktijk is vermoedelijk een mengvorm van bovenstaande scenario's. Dit omdat in ieder geval biomassa gecombineerd zal moeten worden met CO₂-opslag en/of zon/wind/water om voldoende CO₂-emissiereductie te realiseren. Daarnaast bestaan wereldwijd verschillende ideeën over hoe een duurzame energievoorziening eruit zou moeten zien en verschillende landen in de wereld investeren in verschillende energieketens. Bovendien zal, in het geval wordt ingezet op brandstofceltechnologie, conventionele voertuigtechnologie vrijwel zeker blijven bestaan omdat conventionele technologie relatief goedkoop is en de brandstoffen die worden toegepast in brandstofcellen in het algemeen ook kunnen worden toegepast in verbrandingsmotoren.

7. UITWERKING VAN SCENARIO'S

7.1 Scenario 1a (biomassa / zon/wind/water + ICEV)

- biobrandstof uit biomassa (maximale hoeveelheid op mondiale schaal), toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving;
- aangevuld met waterstof geproduceerd uit zon/wind/water, toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving.

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Aandeel van de primaire energiebronnen

Er wordt uitgegaan van de inzet van 10% van het mondiaal landbouwareaal voor de productie van biomassa. Verder wordt ervan uitgegaan dat de sector verkeer en vervoer 20% toekomt van de mondiaal beschikbare biomassa, analoog aan het geschatte aandeel van verkeer in het primaire energiegebruik in 2050 (IIASA/WEC, 1998). Wanneer wordt uitgegaan van de toepassing van ICEV's kan afhankelijk van de opbrengst per hectare, het energiegebruik van de biomassateelt en het rendement van de omzetting in biobrandstof 2 - 15% van het mondiale aardoliegebruik in de sector verkeer en vervoer worden vervangen. De resterende substitutie van de vervanging van aardolie (75 - 88%) zal in dit scenario moeten worden gerealiseerd door waterstof te produceren uit zon/wind/water. Gezien het mondiale technisch potentieel van zon/wind/water vormt dit technisch gezien geen belemmering voor duurzaamheid.

Effecten op niet-CO₂-emissies

Op middellange termijn is het volgens TNO-WT mogelijk om met geavanceerde uitlaatgasnabehandelingstechnieken de emissies door verbrandingsmotoren zeer ver terug te dringen ten opzichte van de emissies door in 2002 nieuw-verkochte wegvoertuigen die voldoen aan Euro3-emissie-eisen (Rijkeboer *et al.*, 2003; Riemersma, 2002). Wanneer in 2050 alle wegvoertuigen met de technisch gezien schoonst mogelijke benzinemotoren zouden zijn uitgerust en alle niet-wegvoertuigen met de schoonst mogelijke dieselmotoren, dan zouden de CO-emissies in 2050 meer dan 75% lager zijn dan in 1990. De VOS-, NO_x- en PM₁₀-emissies zouden in dat geval zelfs meer dan 95% lager zijn dan in 1990.

Bovenstaande waarden gelden in eerste instantie voor de toepassing van fossiele vloeibare brandstoffen, maar zullen ook van toepassing zijn voor vloeibare biobrandstoffen. In dit scenario wordt het overgrote deel van de in de sector verkeer benodigde energie echter opgewekt uit zon/wind/water en zal het merendeel van de sector verkeer gebruik maken van waterstof. Bij het gebruik van waterstof in verbrandingsmotoren zijn de emissies van CO,

VOS en PM₁₀ afwezig en blijft alleen een geringe NO_x-emissie over. Met andere woorden: het is technisch mogelijk om in dit scenario de niet-CO₂-emissies (behalve CO) met meer dan 95% terug te dringen ten opzichte van 1990, ondanks de toepassing van ICEV's.

Effecten op technische kosten van mobiliteit

De technische kosten per personenautokilometer, bestaande uit afschrijving van het voertuig en brandstofkosten (beide exclusief belastingen) zijn voor de energieketen 'biomassa + ICEV's' gemiddeld naar schatting circa 10% (bandbreedte 15% lager tot 80% hoger) hoger dan voor de referentieketen en voor de energieketen 'zon/wind/water + ICEV's' circa 10% hoger (bandbreedte 0 tot 25% hoger). Voor beide alternatieve energieketens geldt dat de brandstofkosten een aandeel hebben van circa 25% in de technische kosten per voertuigkilometer. Het resterende deel bestaat uit afschrijving van het voertuig (op basis van nieuwprijs exclusief belastingen).

Effecten op ruimtegebruik

In dit scenario is verondersteld dat 10% van het landbouwareaal wordt aangewend voor de productie van biomassa. Op mondiaal niveau komt dat neer op circa 0,5 mld hectare. Daarnaast is ook nog een groot oppervlak nodig, circa 0,3 – 0,5 mld hectare, voor de productie van waterstof (via elektriciteit) uit wind (waarbij is uitgegaan van een elektriciteitsopbrengst van circa 0,2 mln kWh/hectare). Hierbij is verondersteld dat elektriciteit wordt omgezet in waterstof omdat het transport van elektriciteit over grote afstanden met enorme energieverliezen gepaard gaat. Bij productie van elektriciteit uit zonne-energie is een geringer oppervlak nodig. Dit laatste kan echter plaatsvinden in gebieden met geringe ecologische waarde zoals woestijnen zodat dit geen bedreiging voor de biodiversiteit betekent. Het totale woestijnoppervlak is wereldwijd ongeveer gelijk aan 2,6 mld hectare, dus er is in principe voldoende ruimte voor grootschalige windenergie.

Effecten op externe veiligheid

De risico's met betrekking tot externe veiligheid die aan het vervoer van LPG met vrachtauto's en de opslag van LPG bij tankstations zijn verbonden, zijn groter dan door het beleid als maatschappelijk acceptabel wordt geacht. Analoog daarmee zou het vervoer en de opslag van waterstof in de toekomst ook tot externe veiligheidsrisico's kunnen leiden. Het probleem van LPG is echter dat de tankstations veelal binnen de bebouwde kom zijn gevestigd en dat het vervoer van LPG met vrachtauto's plaatsvindt. Zou de toekomstige distributie van waterstof middels bijvoorbeeld ondergrondse buisleidingen plaatsvinden en de opslag buiten de bebouwde omgeving, dan zijn de veiligheidsrisico's vermoedelijk wel maatschappelijk acceptabel. De veiligheid van waterstofopslag aan boord van voertuigen is vermoedelijk vergelijkbaar met die van LPG-opslag. Dit vermoeden is echter niet wetenschappelijk onderbouwd.

Belemmeringen voor transitie

Het grote voordeel in dit scenario is dat de veranderingen binnen de sector verkeer minimaal behoeven te zijn. De meeste biobrandstoffen kunnen namelijk, zonder dat motortechnische

aanpassingen nodig zijn, worden bijgemengd aan fossiele benzine of diesel. Synthetische brandstoffen uit biomassa (bijvoorbeeld Fischer-Tropsch) kunnen zelfs puur worden gebruikt in niet-aangepaste verbrandingsmotoren. Daarmee is een geleidelijke overgang van aardolie naar biomassa mogelijk. Toepassing van uit zon/wind/water geproduceerde waterstof vergt wel aanpassingen aan voertuigen, maar de aanpassingen zijn vermoedelijk niet significant verschillend van de aanpassingen voor gebruik van LPG of aardgas. De opslag van waterstof aan boord van voertuigen kan wel een belemmering vormen omdat dit veel ruimte vergt en daarmee de functionaliteit van voertuigen ingrijpend zal beïnvloeden. Mogelijk kan een reformer (zet benzine of methanol om in waterstof) het ruimtegebruik aanzienlijk verminderen. Dit gaat wel ten koste van het ketenrendement.

De belangrijkste transitie moet in dit scenario plaatsvinden in de energieproductiesector en in de landbouwsector. De huidige raffinaderijen moeten op termijn aardolie als grondstof voor motorbrandstoffen vervangen door biomassa. Het enorme ruimtegebruik van de productie van biomassa kan in dit scenario een maatschappelijke belemmering vormen. Ook mogelijke uitwassen als illegale houtkap en voedseltekorten door concurrentie met voedselproductie zullen een maatschappelijke barrière voor biomassa opwerpen.

De belangrijkste technologische barrière voor transitie is het reinigen van het zogenoemde synthesesgas dat ontstaat na vergassing van biomassa. Bij andere vormen van omzetting van biomassa naar biobrandstoffen zoals vergisting speelt dit probleem geen rol.

Een laatste niet te onderschatten belemmering voor transitie is de aanleg van de infrastructuur om waterstof te distribueren. Zolang de beschikbaarheid van waterstof aan de pomp beperkt is zullen weinig consumenten de overstap naar een brandstofcelauto willen maken terwijl private investeerders niet de realisatie van een uitgebreid waterstofdistributienetwerk zullen financieren wanneer de markt voor waterstof beperkt is. Hetzelfde kip-of-ei-probleem speelt op dit moment voor aardgas.

7.2 Scenario 1b (biomassa / zon/wind/water + FCEV / BEV)

- methanol, waterstof of synthetische benzine uit biomassa (maximale hoeveelheid op mondiale of EU-15 schaal), toepassing in FCEV's of elektriciteit uit biomassa, toepassing in BEV's eventueel aangevuld met voeding via infrastructuur ('bovenleiding');
- aangevuld met waterstof/elektriciteit geproduceerd uit zon/wind/water, toepassing in FCEV's/BEV's eventueel aangevuld met voeding via infrastructuur ('bovenleiding').

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Aandeel van de primaire energiebronnen

Idem scenario 1a, behalve dat in dit scenario wordt uitgegaan van de toepassing van FCEV's en BEV's. Wanneer wordt uitgegaan van de toepassing van 100% FCEV's kan afhankelijk van de opbrengst per hectare, het energiegebruik van de biomassateelt en het rendement van de omzetting in brandstof **5 - 35%** van het aardoliegebruik in verkeer worden vervangen. Het resterende deel van de vervanging (55 - 85%) zal moeten worden gerealiseerd door waterstof uit zon/wind/water.

Wanneer wordt uitgegaan van de toepassing van 100% BEV's kan **5 - 50%** van het fossiele energiegebruik worden vervangen. Het resterende deel van de vervanging van fossiele brandstoffen (40 - 85%) zal moeten worden gerealiseerd door elektriciteit uit zon/wind/water. Dit scenario is wellicht niet erg realistisch gezien het feit dat impliciet wordt verondersteld dat batterij-elektrische aandrijving ook in bijvoorbeeld het wegvervoer en de luchtvaart worden toegepast. De beperkte energie- en vermogensdichtheid van batterijen maakt deze aandrijftechnologie niet geschikt voor deze vervoerwijzen.

Effecten op niet-CO₂-emissies

Bij de toepassing van FCEV's zijn de emissies nagenoeg verwaarloosbaar in vergelijking tot het gebruik van ICEV's. De emissies door BEV's zijn afhankelijk van de elektriciteitsproductie. In het geval van elektriciteit van kolencentrales is de NO_x-emissie van een BEV circa 40% lager dan van een moderne ICEV (bouwjaar 1995). In het geval van een gasgestookte centrale is dit 70% (Elzen *et al.* (1996). Verwacht mag worden dat elektriciteitscentrales op lange termijn zo schoon zullen worden dat de emissies van BEV's in 2050 minstens 90% lager zullen zijn dan de emissies van een ICEV's in 1990.

Effecten op technische kosten van mobiliteit

De technische kosten per personenautokilometer, bestaande uit afschrijving van het voertuig en brandstofkosten (beide exlucief belastingen) zijn voor de energieketen 'biomassa + FCEV's' gemiddeld naar schatting circa 20% hoger (bandbreedte 5% lager tot 60% hoger) dan voor de referentieketen en voor de energieketen 'zon/wind/water + FCEV's' circa 20%

hoger (bandbreedte 0 tot 40% hoger). Voor beide alternatieve energieketens geldt dat de brandstofkosten een aandeel hebben van circa 10% in de technische kosten per voertuigkilometer.

Uitgaande van BEV's zijn de technische kosten per personenautokilometer voor 'biomassa + BEV's' naar schatting circa 45% hoger (bandbreedte 10 tot 85% hoger) dan voor de referentieketen en voor 'zon/wind/water + BEV's' circa 40% hoger (bandbreedte 10 tot 70% hoger). De elektriciteitskosten hebben een aandeel van minder dan 5% in de technische kosten per personenautokilometer.

Effecten op ruimtegebruik

In dit scenario is ook verondersteld dat 10% van het landbouwareaal wordt aangewend voor de productie van biomassa. Op mondiaal niveau komt dat neer op circa 0,5 mld hectare. Daarnaast is ook nog een groot oppervlak nodig, circa 0,3 – 0,4 mld hectare, voor de productie van waterstof (via elektriciteit) uit wind. Hierbij is verondersteld dat elektriciteit wordt omgezet in waterstof omdat het transport van elektriciteit over grote afstanden met enorme energieverliezen gepaard gaat. Bij productie van elektriciteit uit zonne-energie is een geringer oppervlak nodig. Dit laatste kan echter plaatsvinden in gebieden met geringe ecologische waarde zoals woestijnen zodat dit geen bedreiging voor de biodiversiteit betekent. Het totale woestijnoppervlak is wereldwijd ongeveer gelijk aan 2,6 mld hectare, dus er is in principe voldoende ruimte voor grootschalige windenergie.

Effecten op externe veiligheid

Idem scenario 1a

Belemmeringen voor transitie

De transities in de energieproductiesector en de landbouwsector zijn indientiek aan scenario 1a. Voor dit scenario zijn, in tegenstelling tot scenario 1a, wel grote veranderingen binnen de sector verkeer nodig. Belangrijkste belemmeringen voor de transitie naar brandstofcel-elektrische of batterij-elektrische aandrijving zijn de kosten. Op dit moment zijn de kosten voor brandstofcellen 2500-5000 USD/kW (Johansson en Ahman, 2002) terwijl de kosten voor een verbrandingsmotor minder dan 100 USD/kW bedragen (NOVEM, 1999b). Accupakketten voor batterij-elektrische aandrijvingen zijn op dit moment een factor 10 duurder dan verbrandingsmotoren (Johansson en Ahman, 2002). De meerkosten kunnen dalen tot minder dan 50% wanneer brandstofcellen en accupakket in massaproductie kunnen worden geproduceerd, maar dat vereist een doorbraak van brandstofcel-elektrische en batterij-elektrische voertuigen nodig. Deze doorbraak zal bij de huidige kostprijzen niet vanzelf plaatsvinden.

Hetzelfde kip-of-ei-probleem speelt bij de aanleg van de infrastructuur om waterstof te distribueren. Zolang de beschikbaarheid van waterstof aan de pomp beperkt is, zullen weinig consumenten de overstap naar een brandstofcelauto willen maken terwijl private investeerders niet de realisatie van een uitgebreid waterstofdistributienetwerk zullen

financieren wanneer de markt voor waterstof beperkt is. Hetzelfde probleem speelt op dit moment voor aardgas.

Het probleem van distributie speelt vermoedelijk minder sterk bij elektriciteit omdat consumenten voertuigen via het reeds bestaande elektriciteitsnet kunnen opladen. Wanneer elektrische voertuigen ook onderweg moeten kunnen worden opgeladen, zijn snellaadstations noodzakelijk. Een optie waarbij elektrische voertuigen elektriciteit kunnen aftappen vanuit de infrastructuur (bovenleiding) is vermoedelijk een nog moeilijker realiseerbare transitie.

7.3 Scenario 2a (fossiel met CO₂-opslag + ICEV)

- waterstof uit fossiele brandstoffen en CO₂-opslag, toepassing in zuinige ICEV's met uitlaatgasbehandeling en hybride aandrijving.

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energiebron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Aandeel van de primaire energiebronnen

Ervan uitgaande dat CO₂-opslag in oceanen geen negatieve gevolgen heeft voor het marine leefklimaat, is de CO₂-opslagcapaciteit voldoende om de mondiale CO₂-emissies gedurende een zeer lange periode (enkele miljoenen jaren) op te slaan en kan CO₂-opslag alleen de mondiale CO₂-emissies met 80% verminderen ten opzichte van 1990. De huidige bewezen en toekomstig nog te verwachten voorraden fossiele brandstoffen zijn echter maar voldoende voor circa 200 jaar (zie paragraaf 3.2).

Effecten op niet-CO₂-emissies

In dit scenario is verondersteld dat de sector verkeer alleen ICEV's op waterstof gebruikt. Verondersteld mag worden dat wanneer ICEV's op conventionele vloeibare brandstoffen op lange termijn 95% minder emitteren dan in 1990, dit ook zal gelden voor ICEV's op waterstof. Dit omdat ICEV's op waterstof in principe alleen NO_x emitteren⁴ en dat door de lagere verbrandingstemperaturen de NO_x-emissie bij het gebruik van waterstof ceteris paribus lager is dan bij het gebruik van benzine of diesel. Volgens IEA/AFIS (1998) emitteren ICEV's op waterstof (zonder uitlaatgasbehandeling) 70% minder NO_x dan ICEV's op benzine (met driewegkatalysator).

Effecten op technische kosten van mobiliteit

De technische kosten per personenautokilometer, bestaande uit afschrijving van het voertuig en brandstofkosten (beide exlucief belastingen) zijn voor de energieketen 'fossiel + CO₂-

⁴ Doordat motorolie in de verbrandingskamer komt en wordt verbrand emitteren voertuigen met verbrandingsmotoren op waterstof ook zeer kleine hoeveelheden CO en VOS.

opslag + ICEV's' gemiddeld naar schatting circa 10% hoger (bandbreedte 10% lager tot 30% hoger) dan voor de referentieketen. De brandstofkosten hebben een aandeel van circa 25% in de technische kosten per voertuigkilometer.

Effecten op ruimtegebruik

Geen

Effecten op externe veiligheid

Voor de externe veiligheidsrisico's verbonden met het transport en de opslag van waterstof bij tankstations en in voertuigen wordt verwezen naar scenario 1. Bovengronds CO₂-transport (onder hoge druk) brengt geen grote veiligheidsrisico's met zich mee mits voldoende aandacht wordt geschonken aan ruimtelijke inpassing en veiligheidsmaatregelen. Ook het risico van het ontsnappen van CO₂ uit opslagvelden is gering. De velden hebben immers ook gedurende miljoenen jaren aardgas vastgehouden. Over andere risico's verbonden aan CO₂-opslag, te weten CO₂-vervuiling van het grondwater, seismische activiteit en verzakking of stijging van het aardoppervlak, is geen informatie gevonden. Ook is niet bekend welke risico's zijn verbonden aan de opslag van CO₂ in oceanen.

Belemmeringen voor transitie

De voordelen van dit scenario ten opzichte van de vorige twee, is dat de noodzakelijke veranderingen in de sector verkeer gering zijn en dat de maatschappelijke impact van CO₂-opslag gering is. CO₂-opslag is immers niet waarneembaar terwijl grootschalige energieteelt, windmolens en zonnecollectoren veel ruimte innemen en tot horizonvervuiling en geluidhinder kunnen leiden. Een belemmering voor dit scenario vormt de maatschappelijke weerstand tegen de opslag van CO₂. Natuur- en milieuorganisaties sluiten CO₂-opslag voor de korte termijn als optie niet uit maar onderstrepen wel dat op langere termijn een transitie naar biomassa of andere vormen van hernieuwbare energie moet plaatsvinden.

Ook in dit scenario speelt het probleem van de aanleg van een waterstofinfrastructuur.

7.4 Scenario 2b (fossiel met CO₂-opslag + FCEV/BEV)

- waterstof uit fossiele brandstoffen en CO₂-opslag, toepassing in FCEV's;
- elektriciteit uit fossiele brandstoffen en CO₂-opslag; toepassing in BEV's eventueel aangevuld met voeding via infrastructuur ('bovenleiding').

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Aandeel van de primaire energiebronnen

Idem scenario 2a

Effecten op niet-CO₂-emissies

Idem scenario 1a

Effecten op technische kosten van mobiliteit

De technische kosten per personenautokilometer, bestaande uit afschrijving van het voertuig en brandstofkosten (beide exclusief belastingen) zijn voor de energieketen 'fossiel + CO₂-opslag + FCEV's' gemiddeld naar schatting circa 15% hoger (bandbreedte 5% lager tot 40% hoger) dan voor de referentieketen. De brandstofkosten hebben een aandeel van circa 10% in de technische kosten per voertuigkilometer.

Uitgaande van BEV's zijn de technische kosten naar schatting circa 45% hoger (bandbreedte 10 tot 75% hoger) dan voor de referentieketen.

Effecten op ruimtegebruik

Geen

Effecten op externe veiligheid

Idem scenario 2a

Belemmeringen voor transitie

De belemmeringen voor transitie zijn voor wat betreft CO₂-opslag gelijk aan scenario 2a en voor wat betreft de kosten van brandstofcellen en accupakketten gelijk aan scenario 1b.

7.5 Scenario 3 ('waterstofvrij')

- biobrandstof uit biomassa (maximale hoeveelheid op mondiale schaal), toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving;
- aangevuld met elektriciteit geproduceerd uit zon/wind/water, toepassing in BEV's eventueel aangevuld met voeding via infrastructuur ('bovenleiding').

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa	biobrandstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel + CO ₂ -opslag	waterstof	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Aandeel van de primaire energiebronnen

Het potentieel van biomassa om het gebruik van fossiele energie terug te dringen is gelijk aan dat in scenario 1a. Om 90% reductie van de CO₂-emissies te bereiken moet biomassa worden aangevuld met opwekking van elektriciteit uit zon/wind/water. Het rendement van deze energieketen is aanzienlijk hoger dan van het gebruik van waterstof in ICEV's. De hoeveelheid areaal die nodig is voor opwekking van zon/wind/water is dan ook geringer dan in scenario 1a, ofwel geringer dan 0,3 tot 0,5 miljard hectare.

Effecten op niet-CO₂-emissies

Idem scenario 1a, met uitzondering van NO_x dat in dit scenario lager is dan in scenario 1a omdat de toepassing van uit zon/wind/water geproduceerde waterstof in verbrandingsmotoren (ICEV) tot NO_x-emissies leidt terwijl bij opwekking van elektriciteit en toepassing in BEV's geen NO_x-emissies ontstaan.

Effecten op technische kosten van mobiliteit

Zie scenario 1a voor de kosten van 'biomassa + ICEV's' en scenario 1b voor de kosten van 'zon/wind/water + BEV's'.

Effecten op ruimtegebruik

In dit scenario is ook verondersteld dat 10% van het landbouwareaal wordt aangewend voor de productie van biomassa. Op mondiaal niveau komt dat neer op circa 0,5 mld hectare. Met name het gebruik van bosareaal zou een negatief effect op de biodiversiteit kunnen hebben. Daarnaast is ook nog een groot oppervlak nodig, circa 0,3 – 0,4 mld hectare, voor de productie van waterstof (via elektriciteit) uit wind. Bij productie van waterstof uit zonne-energie is een geringer oppervlak nodig. Dit laatste kan echter plaatsvinden in gebieden met geringe ecologische waarde zoals woestijnen zodat dit geen bedreiging voor de biodiversiteit betekent. Het totale woestijnoppervlak is wereldwijd ongeveer gelijk aan 2,6 mld hectare.

Effecten op externe veiligheid

Geen

Belemmeringen voor transitie

De belemmeringen voor transitie zijn voor wat betreft de productie van biomassa en het gebruik in verbrandingsmotoren gelijk aan scenario 1a en voor wat betreft het gebruik van batterij-elektrische voertuigen aan scenario 1b.

7.6 Scenario 4 (biomassa met CO₂-opslag / fossiel / zon/wind/water + ICEV)

- waterstof uit biomassa (maximale hoeveelheid op mondiale schaal) en CO₂-opslag, toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving;
- aangevuld met een aan de opgeslagen hoeveelheid CO₂-emissies equivalente hoeveelheid fossiele brandstoffen in ICEV's, toepassing in zeer zuinige ICEV's met uitlaatgasnabehandeling en hybride aandrijving;
- resterende CO₂-emissiereductie door toepassing van waterstof uit zon/wind/water in ICEV's.

		voertuigtechnologie		
		ICEV	FCEV	BEV
primaire energie-bron	biomassa + CO ₂ -opslag	waterstof	methanol, waterstof, synth. benzine	elektriciteit
	fossiel	benzine/diesel/LPG	waterstof	elektriciteit
	zon/wind/water	waterstof	waterstof	elektriciteit

Aandeel van de primaire energiebronnen

In dit scenario is verondersteld dat een maximale hoeveelheid biomassa wordt geproduceerd en wordt omgezet in waterstof waarbij de vrijkomende CO₂ wordt opgeslagen. De hoeveelheid CO₂ die jaarlijks wordt opgeslagen compenseert (voor een deel) het gebruik van fossiele brandstoffen door vervoermiddelen waarvoor de transitie naar brandstofcel- of batterij-elektrische aandrijving technisch niet mogelijk is of economisch niet haalbaar. Denk bijvoorbeeld aan de luchtvaart of de scheepvaart waar lage brandstofprijzen een belemmering vormen voor de toepassing van alternatieven. Bij de luchtvaart speelt bovendien nog mee dat gasturbines zouden moeten worden vervangen door elektromotoren die propellers aandrijven. Dit zal zeer waarschijnlijk leiden tot een hogere geluidemissie, hoger vliegtuiggewicht en hogere aanschaf- en onderhoudskosten voor vliegtuigen.

Om in dit scenario op lange termijn een CO₂-emissiereductie van 90% te behalen kan niet worden volstaan met alleen biomassa. Op basis van scenario 1a kan worden geconcludeerd dat biomassa, uitgaande van 10% van het landbouwareaal en een evenredige verdeling van de beschikbare biomassa over sectoren, slechts 2 tot 20% van het aardoliegebruik in de sector verkeer kan vervangen. Als compensatie voor het feit dat én de biomassa tijdens de groei CO₂ heeft opgenomen én tijdens de omzetting naar waterstof de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen, kan in de sector verkeer 2 tot 20% van het aardoliegebruik worden gehandhaafd zonder dat de sector verkeer netto CO₂ wordt geëmitteerd.

Zelfs bij omzetting van biomassa in waterstof en gelijktijdige opslag van de daarbij vrijkomende CO₂-emissies, kan biomassa alleen niet de CO₂-emissies in de sector verkeer met meer dan 80% verminderen ten opzichte van 1990. Daarom is verondersteld, analoog aan scenario 1a en 1b, dat biomassa wordt gecombineerd met waterstof uit zon/wind/water en toepassing in ICEV's.

Effecten op niet-CO₂-emissies

Vergelijkbaar met scenario 1a en 2a.

Effecten op technische kosten van mobiliteit

De kosten voor voertuigen die waterstof, geproduceerd uit biomassa met CO₂-opslag, in verbrandingsmotoren gebruiken zijn relatief hoog vergeleken met de andere beschouwde energieketens. Daar staat echter tegenover dat een (minder) groot aantal voertuigen fossiele brandstoffen kan blijven gebruiken. Per saldo zijn de kosten in dit scenario hoger dan in bijvoorbeeld scenario 1a.

Effecten op ruimtegebruik

Het ruimtegebruik is vergelijkbaar met dat in scenario 1a en 1b omdat is verondersteld dat de maximale hoeveelheid biomassa wordt geteeld. Het ruimtebesparende effect van de opslag van CO₂ is relatief gering zodat even zo goed een groot areaal nodig is voor de productie van energie uit zon/wind/water.

Effecten op externe veiligheid

Nagenoeg de gehele sector verkeer (80 tot bijna 100%) maakt in dit scenario gebruik van waterstof als energiedrager hetgeen problemen zou kunnen opleveren met de externe veiligheid.

Belemmeringen voor transitie

Dit scenario heeft wederom als voordeel dat de technische aanpassingen in de sector verkeer en vervoer relatief gering zijn. Alleen het gebruik van uit biomassa of zon/wind/water geproduceerde waterstof in verbrandingsmotoren heeft als belemmering dat opslag van waterstof aan boord van voertuigen veel ruimte vergt en wellicht door consumenten als onveilig wordt ervaren.

In dit scenario wordt uitgegaan van een beperkte mate van CO₂-opslag. CO₂-opslag kan worden gehinderd door maatschappelijke weerstanden (zie scenario 2a).

7.7 Samenvatting

Tabel 15 geeft een samenvattend overzicht van de uitwerking van de 6 scenario's.

Tabel 15 *Beoordeling van scenario's op verschillende duurzaamheidsaspecten, mondiale schaal*

duurzame energiebron + energiedrager + voertuigtechnologie ^{a)}	niet-CO ₂ -emissies ^{b)} (alleen V&V)	mondiaal ruimtegebruik ^{c)} (alle sectoren) [mld hectare]	technische kosten per kilometer ^{d)} (alleen V&V) [index]	externe veiligheid	belemmeringen voor transitie (alleen V&V)
biomassa + biobrandstof ^{e)} + ICEV zon/wind/water + waterstof + ICEV	lager	~ 1	85 / 175 100 / 130	?	- ruimtegebruik biomassa productie - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstofdistributie
biomassa + biobrandstof ^{f)} + FCEV biomassa + elektriciteit + BEV zon/wind/water + waterstof + FCEV zon/wind/water + elektriciteit + BEV	veel lager	~ 1	95 / 220 100 / 160 105 / 150 100 / 145	?	- ruimtegebruik biomassa productie - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstofdistributie - kostprijs brandstofcellen/accupakketten
fossiel met CO ₂ -opslag + waterstof + ICEV	lager	0	95 / 115	?	- draagvlak voor CO ₂ -opslag - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstofdistributie
fossiel met CO ₂ -opslag + waterstof + FCEV fossiel met CO ₂ -opslag + elektriciteit + BEV	veel lager	0	100 / 140 105 / 150	?	- draagvlak voor CO ₂ -opslag - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstofdistributie - kostprijs brandstofcellen/accupakketten
biomassa + biobrandstof ^{e)} + ICEV zon/wind/water + elektriciteit + BEV	lager	~ 1	85 / 175 100 / 145	?	- ruimtegebruik biomassa productie - kostprijs accupakketten
biomassa met CO ₂ -opslag + waterstof + ICEV aardolie + fossiele brandstof ^{g)} + ICEV zon/wind/water + waterstof + ICEV	lager	~ 1	? 100 100 / 130	?	- ruimtegebruik biomassa productie - CO ₂ -opslag - opslag waterstof aan boord voertuig - aanleg infrastructuur waterstofdistributie

a) ICEV: internal combustion engine vehicle = voertuig met een verbrandingsmotor; FCEV: fuel-cell-electric vehicle = voertuig met brandstofcellen en een elektromotor; BEV: battery-electric vehicle = voertuig met batterijen en een elektromotor;

b) kwalitatieve inschatting van de verandering in emissies door en de externe veiligheid van verkeer en vervoer ten opzichte van de referentie-energieketen: 'aardolie + fossiele brandstof + ICEV';

c) ruimtegebruik (in miljard hectare) als gevolg van biomassa teelt en/of opwekking van wind- of zonne-energie voor een duurzame energievoorziening **in alle sectoren**;

d) geïndexeerde lage en hoge schatting voor de kosten per kilometer door voertuigafschrijving en brandstofgebruik (exclusief belastingen) voor personenauto's, 'aardolie + fossiele brandstof + ICEV' is op 100 geïndexeerd;

e) bijvoorbeeld ethanol, methanol, waterstof, biodiesel, DME en synthetische benzine/diesel;

f) bijvoorbeeld ethanol, waterstof en synthetische benzine;

g) bijvoorbeeld benzine, diesel en LPG.

8. CONCLUSIES

Van de beoordelingscriteria voor duurzame mobiliteit, zoals opgesteld door het Ministerie van VROM, is de vereiste CO₂-emissiereductie met 80% ten opzichte van 1990 waarschijnlijk de moeilijkst realiseerbare. In dit rapport is daarom als eerste een inschatting gedaan van het technisch potentieel op lange termijn (zeg 2050) van drie duurzame energiebronnen (biomassa, fossiel + CO₂-opslag en zon/wind/water) om de mondiale CO₂-emissies door het gebruik van fossiele energie (in alle sectoren) met meer dan 80% te verminderen ten opzichte van 1990. Ook is een inschatting gedaan wat de potentie is op EU-schaal waarbij ervan is uitgegaan dat EU binnen haar territorium in haar eigen energievoorziening moet voorzien. Bij deze potentiëleinschatting zijn in deze studie enkele belangrijke randvoorwaarden gedefinieerd:

- maximaal 10% van het mondiale landbouwareaal kan worden benut voor de teelt van biomassa. Dit percentage is arbitrair omdat het sterk afhankelijk is van de bevolkingsgroei en het dieet van de gemiddelde wereldburger in 2050. Het percentage kan hoger zijn maar ook minder dan 0%, ofwel op lange termijn kan het totale landbouwareaal te klein zijn om voldoende voedsel te produceren.
- bestaande bossen worden niet gebruikt voor de teelt van biomassa, wel is verondersteld dat afval uit de houtverwerkende industrie wordt aangewend voor energetische doeleinden;
- in alle sectoren vindt dezelfde mate van substitutie van fossiele energie plaats. Ofwel: de beschikbare hoeveelheid biomassa, CO₂-opslagcapaciteit of windenergie is verdeeld over de sectoren naar rato van het fossiele energiegebruik in 2050.

Uitgaande van bovenstaande veronderstellingen blijkt dat 'biomassa' alleen niet voldoende potentie heeft om de mondiale CO₂-emissies met meer dan 80% te reduceren ten opzichte van 1990. 'Fossiel + CO₂-opslag' heeft dat wel, maar niet onbeperkt. Dit ligt niet aan de opslagcapaciteit voor CO₂ want deze is nagenoeg oneindig wanneer opslag in oceanen maatschappelijk haalbaar en ecologisch verantwoord blijkt. Het probleem is dat de mondiale voorraden fossiele energie eindig zijn: de huidige inschatting is dat de voorraden gelijk zijn aan circa 200 maal het huidige jaarlijkse fossiele energiegebruik. De technische potentie van zon/wind/water blijkt op mondiale schaal ruim voldoende om het fossiele energiegebruik volledig te substitueren. Bovendien kunnen windparken of zonnecollectoren worden geplaatst op onvruchtbare gronden zodat concurrentie met voedselproductie en afwenteling op biodiversiteit zijn uitgesloten.

Ook op EU-schaal blijkt de potentie van biomassa (geproduceerd binnen de EU-15) te gering om de CO₂-emissies in de EU-15 met meer dan 80% te verminderen ten opzichte van 1990. Hetzelfde geldt voor CO₂-opslag en productie van energie uit zon/wind/water. Een aanzienlijk grotere EU zal deze conclusie niet veranderen.

Aan de hand van het CO₂-reductiepotentieel, het ketenrendement en de technische kosten van energieketens zijn scenario's opgesteld met een enkele energieketen of een combinatie van energieketens. Voor al deze scenario's geldt minimaal dat de mondiale CO₂-emissies met

meer dan 80% worden verminderd ten opzichte van 1990. De scenario's zijn vervolgens beoordeeld op het effect op niet-CO₂-emissies, ruimtegebruik, technische kosten, externe veiligheid en belemmeringen voor transitie.

De niet-CO₂-emissies door de sector verkeer kunnen op lange termijn technisch gezien met 95% worden teruggedrongen. Zelfs de emissies uit verbrandingsmotoren kunnen door technische verbeteringen met meer 95% worden teruggedrongen ten opzichte van de huidige emissieniveau's. Deze technische verbeteringen moeten natuurlijk wel door bijvoorbeeld emissienormering worden afgedwongen en gaan met kosten gepaard.

Het ruimtegebruik ten behoeve van een verduurzaming van de energievoorziening in alle sectoren is aanzienlijk in het geval de optie CO₂-opslag wordt uitgesloten. In verschillende scenario's is verondersteld dat 10% van het mondiale landbouwareaal wordt gebruikt voor de teelt van biomassa. Dit komt overeen met 0,5 miljard hectare. Dit is gelijk aan 1,6 keer het totale oppervlak van de EU-15 en circa 150 maal het oppervlak van Nederland. Daarnaast is nog eens 0,1 tot 0,2 of 0,4 tot 0,7 miljard hectare nodig voor de productie van elektriciteit uit zonne-energie respectievelijk windenergie. Windturbines en zonnecollectoren kunnen, in tegenstelling tot biomassa, worden geplaatst op onvruchtbare gronden zoals woestijnen waardoor de concurrentie met voedselproductie of de bedreiging van de biodiversiteit uitgesloten zijn. In totaal is dus 0,6 tot 1,2 miljard hectare nodig voor het verminderen van het fossiele energiegebruik in alle sectoren met 80% ten opzichte van het niveau in 1990 indien geen opslag van CO₂ plaatsvindt.

De kosten per voertuigkilometer (voertuigafschrijving en brandstofkosten) van de alternatieve energieketens zijn op lange termijn maximaal circa 100% hoger dan bij het gebruik van fossiele energie in verbrandingsmotoren. In sommige gevallen kunnen de kosten van alternatieve energieketens ook lager zijn, bijvoorbeeld bij energieketens waarbij biobrandstoffen worden toegepast in verbrandingsmotoren. Bij deze kostenschattingen is ervan uitgegaan dat de kostprijzen van brandstofcellen en accupakketten de komende 50 jaar fors (met een factor 50 respectievelijk 5-10) zullen dalen door technologische ontwikkeling en door massaproductie (leer- en schaafeffecten). De kosten per kilometer van een alternatieve energieketen worden voornamelijk bepaald door de meerkosten van voertuigtechnologie en in veel mindere mate door de meerkosten van de energiedrager.

Problemen met externe veiligheid kunnen optreden bij energieketens waarbij gasvormig onder hoge druk opgeslagen waterstof als energiedrager wordt toegepast. Het vervoer van waterstof met ondergrondse buisleidingen en de opslag van waterstof buiten de bebouwde kom zullen het probleem waarschijnlijk sterk verminderen. Aanvullend onderzoek is nodig om uitspraken te kunnen doen over de externe veiligheid van gasvormig waterstof als energiedrager in de sector verkeer en vervoer. Andere vormen van waterstofopslag (bijvoorbeeld metaalhydriden, natrium borohydriden of vloeibaar) geven geen externe veiligheidsproblemen. Transport en ondergrondse opslag van CO₂ worden in het algemeen als veilig beschouwd, maar nader onderzoek is gewenst.

Als ruimtegebruik in relatie tot concurrentie met voedselproductie/drinkwatervoorziening en afwenteling op biodiversiteit door het beleid als belangrijke indicatoren worden aangemerkt voor een keuze tussen energieketens, ligt het voor de hand de aandacht voor de lange termijn te richten op elektriciteit of waterstof uit zon/wind/water. Dit omdat deze energiebron op mondiale schaal een enorm potentieel heeft en omdat windparken of zonnecollectoren op bijvoorbeeld woestijngronden kunnen worden geplaatst en concurrentie met voedselproductie of drinkwatervoorziening of aantasting van biodiversiteit uitgesloten zijn. In de tijd die het vergt om op grote schaal energie op te wekken uit zonlicht, wind of waterkracht zou de optie 'fossiel + CO₂-opslag' kunnen worden ingezet om op korte termijn al een bepaalde mate van CO₂-emissiereductie te kunnen realiseren. Ook biomassa moet voor de korte termijn niet worden uitgesloten omdat een transitie naar biobrandstoffen (toegepast in verbrandingsmotoren) in de sector verkeer, in vergelijking tot een transitie naar bijvoorbeeld energieketens met waterstof als energiedrager of met brandstofcelvoertuigen, relatief eenvoudig is te realiseren.

9. DISCUSSIE

In het vorige hoofdstuk is geconcludeerd dat het technisch mogelijk is om de mondiale CO₂-emissies door fossiel energiegebruik op lange termijn met meer dan 80% te verminderen ten opzichte van 1990. Deze vermindering is waarschijnlijk één van de moeilijkste haalbare voorwaarden voor een duurzame energievoorziening. In deze rapportage zijn alleen de technische kosten van alternatieve energieketens en het technisch potentieel daarvan belicht. Dat het technisch mogelijk is met een of meerdere energieketens tot een duurzame energievoorziening binnen verkeer te komen en dat dit wellicht ook nog goedkoper is dan de referentieketen wil natuurlijk nog niet zeggen dat een transitie naar deze energieketens ook daadwerkelijk ergens in de toekomst zal zijn gerealiseerd. De kosten van alternatieve voertuigtechnologieën en energiedragers zijn bijvoorbeeld op dit moment nog aanzienlijk hoger dan de kosten zoals gerapporteerd in hoofdstuk 5. Dit is enerzijds het gevolg van het feit dat het nieuwe technologieën betreft die moeten worden geoptimaliseerd. Anderzijds zijn de hogere kosten nu het gevolg van het feit dat de productie-aantallen laag zijn en de kosten bij een toename van deze aantallen in het algemeen zullen dalen. De aantallen nemen echter pas toe als de nieuwe technologie goedkoper is dan de conventionele technologie of door beleid wordt afgedwongen.

Energieketens die gebruik maken van conventionele voertuigtechnologie (verbrandingsmotoren) hebben - ceteris paribus - naar verwachting meer kans op doorbraak dan energieketens waarin brandstofcelvoertuigen of elektrische voertuigen worden toegepast. Bovendien geldt dat veel energiedragers op basis van biomassa (bijvoorbeeld biodiesel en ethanol) zonder (grote) aanpassingen kunnen worden bijgemengd aan fossiele brandstoffen en gebruikt in verbrandingsmotoren en dat de brandstofinfrastructuur niet hoeft te worden aangepast. Daardoor kan de overgang van fossiele brandstoffen naar biobrandstoffen geleidelijk plaatsvinden. Energieketens waarvoor zowel de brandstofinfrastructuur als de voertuigtechnologie moeten veranderen, denk aan waterstof in brandstofcelvoertuigen, zullen moeilijker van de grond komen dan energieketens waarvoor maar één van beide hoeft te veranderen (bijvoorbeeld synthetische benzine of methanol in brandstofcelvoertuigen of waterstof in verbrandingsmotoren).

Naast de kosten en de mate van transitie speelt ook de opstelling van actoren tegenover een alternatieve energieketen een belangrijke rol bij het succes of falen van een alternatieve energieketen. De auto- en olie-industrie moet bijvoorbeeld willen investeren in (onderzoek naar) alternatieven. Daarnaast moeten consumenten bereid worden gevonden om brandstofcelvoertuigen of elektrische voertuigen te kopen.

Technische kosten zijn een onderdeel van de maatschappelijke kosten van een alternatieve energieketen. Andere maatschappelijke kosten zijn bijvoorbeeld het feit dat de teelt van biomassa voor een deel concurreert met natuurontwikkeling. Daarnaast kunnen alternatieve energieketens ook maatschappelijke baten genereren, denk bijvoorbeeld aan een vermindering van emissies of een economische impuls voor de landbouw in geval van de keuze voor biomassa. Het voert voor deze studie te ver om voor iedere energieketen een

volledige maatschappelijke kosten-batenanalyse uit te voeren. Het uitvoeren van een maatschappelijke kosten-batenanalyse verdient niettemin aanbeveling omdat zonder een maatschappelijke kosten-batenanalyse de voor- en nadelen van de verschillende energieketens eigenlijk niet tegen elkaar kunnen worden afgewogen.

In dit rapport is verondersteld dat de toedeling van de duurzame energiebronnen, bijvoorbeeld biomassa, over de individuele sectoren plaatsvindt naar rato van het primaire energiegebruik in de sectoren. Het kan echter kosten-effectiever zijn om biomassa volledig in te zetten in één bepaalde sector en in andere sectoren één van de andere primaire energiebronnen in te zetten. Uit de literatuur blijkt dat per eenheid biomassa een grotere CO₂-emissiereductie kan worden behaald wanneer biomassa wordt bijgestookt in elektriciteitscentrales dan wanneer van biomassa transportbrandstoffen worden gemaakt en deze worden toegepast in verbrandingsmotoren. De reden hiervoor is dat de omzetting van biomassa in brandstoffen met energieverlies gepaard gaat terwijl biomassa direct kan worden bijgestookt in elektriciteitscentrales (Azar *et al.*, 2001). Wanneer in plaats van verbrandingsmotoren brandstofcellen of batterijen in combinatie met elektromotoren worden toegepast is het waarschijnlijk efficiënter om de biomassa in de sector verkeer en vervoer toe te passen, behalve natuurlijk wanneer ook elektriciteitproductie met brandstofcellen plaatsvindt. Een argument dat er juist voor pleit om de beschikbare biomassa (in combinatie met verbrandingsmotoren) volledig in de sector verkeer in te zetten, is dat de andere opties vermoedelijk veel minder kansrijk zijn.

Verder is impliciet verondersteld dat in alle sectoren een CO₂-emissiereductie van 80% moet worden gerealiseerd. Het kan echter per saldo kosten-effectiever zijn om in de sector verkeer en vervoer minder CO₂-emissiereductie te realiseren en in de andere sectoren meer, of andersom.

Vervolgonderzoek is nodig om de in dit rapport weergegeven bandbreedtes voor het potentieel van duurzame primaire energiebronnen en de kosten van energieketens te verkleinen. Verder is onderzoek nodig om op onder andere de volgende vragen antwoord te kunnen geven:

- in welke sectoren kunnen de verschillende primaire energiebronnen het best worden ingezet?
- wat is voor de lange termijn de gewenste energieketen in verkeer en vervoer en is dat voor verschillende categorieën verkeer en vervoer dezelfde energieketen?
- hoeveel areaal is er op lange termijn beschikbaar voor energieteelt zonder dat de biodiversiteit of de voedselvoorziening in gevaar komt?;
- wat zijn de gevolgen van CO₂-opslag in oceanen?;
- hoe kan de ecologische kwaliteit van geïmporteerde biomassa worden gecontroleerd om illegale houtkap te voorkomen?
- hoe hoog zijn de N₂O-emissies door de teelt van biomassa en hoe staat dit in verhouding tot de CO₂-emissiereductie?
- wat is de externe veiligheid van (gasvormige) waterstof distributie en -opslag?
- hoe kan de transitie naar de gewenste energieketen(s) daadwerkelijk worden gerealiseerd (transitiemanagement)?

LITERATUUR

- Algemene Energieraad (2001) *Zorgen voor de energie van morgen*, Advies aan de Minister van Economische Zaken, Algemene Energieraad, Den Haag, oktober 2001
- Ampere (2000) *Rapport van de commissie voor de Analyse van de Middelen voor Productie van Elektriciteit en de Reëvaluatie van de Energifactoren (AMPERE), Sectie F: Hernieuwbare en alternatieve energieën*, Commissie Ampere, Brussels
- Armstrong, A.P., J. Baro, J. Dartoy, A.P. Groves, J. Nikkonen, D.J. Rickeard (2002) *Energy and greenhouse gas balance of biofuels for Europe – an update*, Concawe, Brussels, April 2002
- Azar, C., K. Lindgren, B.A. Andersson (2001) *Hydrogen or methanol in the transportation sector?*, Department of Physical Resource Theory, Chalmers University of Technology, Göteborg University, Göteborg, Zweden
- Berndes, G., M. Hoogwijk, Broek, R. van den (2002) The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, *Biomass & Bioenergy*, article in press, accepted 28 October 2002
- Binsbergen, A.J. van, A. Erkens, B. Hamel (1994) *Long-term energy efficiency improvements for transport, technology assessments*, Faculteit Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft, Delft, december 1994
- Boo, W. (1993) *Environmental and energy aspects of liquid biofuels*, Centrum voor Energiebeparing en schone technologie, Delft, februari 1993
- Borgwardt (2001) Platinum, fuel cells, and future US road transport, *Transportation Research Part D*, Vol. 6, pp. 199-207
- Bosch, A. van den, P. McKay, T. Fischer, S. Lines, U. Schwegler, G. Reinhardt, U. Lambrecht (2000) *Impacts of EV's on energy, the environment and transport systems*, paper gepresenteerd op het Colloquium 'Verkeer, milieu en techniek', 29 juni 2000, RIVM, Bilthoven
- Bouman, R., P. Hofmeijer, P. Vergragt, P. Janse, B. Kampman, R. te Riet (2002) *VROM ambities voor duurzame mobiliteit*, notitie Projectteam Duurzame Mobiliteit, Ministerie van VROM/ CE, Den Haag/Delft, februari 2002
- BOVAG-RAI (2000) *Mobiliteit in cijfers 2000*, Stichting BOVAG-RAI Mobiliteit, Bunnik/Amsterdam
- Brink, R.M.M. van den, G.P. van Wee (2001) Why has car-fleet specific fuel consumption not shown any decrease since 1990? Quantitative analysis of Dutch passenger car-fleet specific fuel consumption, *Transportation Research Part D*, volume 6, pp.75-93
- Brink, R.M.M. van den, J.A. Annema (2002) *Duurzame mobiliteit: achtergrondinformatie en factsheets*, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven (in voorbereiding)
- Clemens, T.G., K. Wit (2001) *Zero Emission Power Generation Power plant concepts and CO₂ injection into gasfields*, Shell technology EP, Rijswijk
- Commissie van de Europese Gemeenschappen (2001) *Voorstel voor een richtlijn van het Europees Parlement en de Raad tot bevordering van het gebruik van biotransportbrandstoffen*, Commissie van de Europese Gemeenschappen, COM(2001) 547 definitief, Brussel, november 2001
- ECN (1996) *Bijdrage Derde Energienota*, Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten

- ECN/RIVM (1998) *Optiedocument voor emissiereductie van broeikasgassen; inventarisatie in het kader van de Uitvoeringsnota Klimaatbeleid*, Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN)/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Petten/Bilthoven, oktober 1998
- EEA (2000) *Are we moving in the right direction? Indicators on transport and environment integration in the EU, TERM 2000*, Environmental issue series No. 12, European Environment Agency, Kopenhagen
- EEA (2002) *Energy and environment in the European Union*, Environmental issue report nr. 31, European Environment Agency, Kopenhagen
- Elzen, B., R. Hoogma, J. Schot (1996) *Mobiliteit met toekomst; naar een vraaggericht technologiebeleid*, Universiteit Twente, i.o.v. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag, oktober 1996
- ENDS (2002) *Storm over CO₂ ocean sequestration plan*, Environment Daily 1254, 10/7/2002
- Faaij, A., R. van den Broek, E. Lysen, D. Gielen, M. Hoogwijk, J. Wolf (2000a), *Mondiale beschikbaarheid en mogelijkheden voor import van biomassa in Nederland – synthese van het onderzoeksproject "GRAIN: Global Restrictions on Biomass Availability for Import to the Netherlands"*, Universiteit Utrecht, Vakgroep Natuurwetenschap en Samenleving
- Faaij, A., C. Hamelinck, M. Tijmensen (2000b) *Long term perspectives for production of fuels from biomass; integrated assessment and RD&D priorities – preliminary results* -, in: contributions of Science Technology and Society Utecht University to 1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Sevilla 2000, Universiteit Utrecht
- Folkert, R.J.M. (2000) *CO₂-opslag: potentieel en milieu/veiligheidsaspecten*, notitie t.b.v. de Integrale Workshop COOL, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven
- Grubb, M.J., N.I. Meyer (1993) *Wind energy: resources, systems, and regional strategies*, in: *Renewable Energy: sources for fuels and electricity*, edited by T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy, R.H. Williams, Island Press, Washington D.C.
- Hall, D.O., F. Rosillo-Calle, R.H. Williams, J. Woods (1993) *Biomass for energy: supply prospects*, in: *Renewable Energy: sources for fuels and electricity*, edited by T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy, R.H. Williams, Island Press, Washington D.C.
- Hamelinck, C.N., A.P.C. Faaij, G.J. Ruijg, D. Jansen, H. Pagnier, F. van Bergen, K.H. Wolf, O. Barzandji, H. Bruining, H. Schreurs (2001) *Potential for CO₂ sequestration and Enhanced Coalbed Methane production in the Netherlands*, Universiteit Utrecht/ ECN/ TNO/ Technische Universiteit Delft/ NOVEM, Utrecht
- Hekkenberg, M. (2002) *De rol van actoren bij introductie van verschillende nieuwe technologieketens in het verkeer en vervoer*, IVEM-doctoraalverslag nr. 138, IVEM, Centrum voor Energie en Milieukunde, Rijksuniversiteit Groningen, januari 2002
- Hendriks, C., M. Harmelink, Y. Hofmans, D. de Jager (2002a) *Climate neutral energy carriers in the regulatory energy tax (REB)*, Ecofys, Utrecht
- Hendriks, C., W. Graus, F. van Bergen (2002b) *Global carbon dioxide storage potential and costs*, Ecofys, Utrecht

- IEA/AFIS (1996) *Automotive fuels survey part 1: Raw materials and conversion*, IEA Automotive Fuels Information Service, Breda
- IEA/AFIS (1998) *Automotive fuels survey part 3: Comparison and selection*, IEA Automotive Fuels Information Service, Breda
- IEA (2002) *Ocean storage of CO₂*, International Energy Agency, <http://www.ieagreen.org.uk/ocean1.htm> (geraadpleegd op 2-7-2002)
- IIASA/WEC (1998) *Global Energy Perspectives 1998*, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)/ World Energy Council (WEC), Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Jager, D. de, C. Faaij, W.P. Troelstra (1998) *Kosten-effectiviteit van transportbrandstoffen uit biomassa*, Ecofys Energy and Environment/ Universiteit Utrecht/ Innas BV., Utrecht/Breda
- Johansson, B. (1996) Transportation fuels from Swedish biomass – environmental and cost aspects, *Transportation Research Part D*, Vol. 1, No. 1, pp. 47-62
- Johansson, B., M. Ahman (2002) A comparison of technologies for carbon-neutral passenger transport, *Transportation Research Part D*, Vol. 7, pp. 175-196
- Kampman, B. (2002) *Klimaatneutrale energie in de transportsector; een institutionele en politieke scan van verschillende opties*, CE, Delft
- Levine, M., M. Hirose (1995) *Energy Efficiency Improvement Utilizing High Technology: An Assessment of Energy Use in Industry and Buildings; Report and Case Studies*, World Energy Council (WEC), London
- Menkveld, M. (2002) *Duurzame Energie en Ruimte, De potentiële bijdrage van duurzame energie aan CO₂-reductie in Nederland*, ECN rapport nr: ECN-C--02-058, ECN, Petten
- MinEco (2002) *Evolutie van de energiemarkt in 1999*, Ministerie van Economische Zaken, België, http://mineco.fgov.be/redir.asp?loc=/energy/balance_sheets/home_nl.htm, (geraadpleegd op 9-8-2002)
- NOVEM (1999a) *Analyse en evaluatie van GAVE-ketens*, GAVE-rapport 9909, deel 2 van 3, NOVEM, Utrecht
- NOVEM (1999b) *Analyse en evaluatie van GAVE-ketens*, GAVE-rapport 9909, deel 3 van 3, NOVEM, Utrecht
- OECD/IEA (1999) *Automotive fuels for the future; the search for alternatives*, Organisation for Economic Co-operation and development (OECD), International Energy Agency (IEA), Parijs
- Ogden, J.M., M.M. Steinbugler, G.T. Kreutz (1999) A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development, *Journal of Power Sources*, Vol. 79, pp. 143-168
- PDE (2002) *Wat is duurzame energie?*, <http://www.duurzame-energie.nl/de/de.php>, (geraadpleegd op 16 mei 2002), Projectbureau Duurzame Energie, Arnhem
- Peeters, J.H.A.M. (1997) *Vliegtuigtechniek en luchtverontreiniging in historisch perspectief*, paper gepresenteerd op het Colloquium 'Verkeer, milieu en techniek', 24 september 1997, RIVM, Bilthoven
- Raskin, P. (2002) Global Energy Problems in the 21st Century, *Renewable Energy for Development*, October 1995, Vol. 8, No. 3, Stockholm Environment Institute (SEI)

- Riemersma, I. (2002) *Prognose minimaal haalbaar brandstofverbruik en emissies heavy-duty wegvoertuigen*, notitie, TNO Wegtransportmiddelen, Delft, 13 juni 2002
- Rijkeboer, R.C., A.J.J. Dijkhuizen, N.L.J. Gense, H.C. van de Burgwal, R.T.M. Smokers (2003) *Future emissions of passenger cars; Expert judgement on the long term possibilities of conventional emission abatement technology*, final draft, TNO Automotive, Delft, 16 april 2003
- Smokers, R.T.M., S. Mourad, E. van den Tillaart, D. Schmal (1999) *Assessment of the energy consumption of fuel cell and conventional vehicles in the context of Annex X of the IEA implementing Agreement "Advanced Fuel Cells"*, TNO Automotive, Delft
- Spakman, J., R. Folkert, G.-J. van den Born (2001) Biomassa: potentieel en implicaties, paper ten behoeve van de dialooggroep Landbouw en Voeding in het kader van het project COOL-NL, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Spirinckx, C., D. Ceuterick (1997) Van koolzaad tot biodiesel: de levenscyclusanalyse Lucht, nummer 4, december 1997
- TNO-INRO (2001) *Urban car: markkansen voor een nieuw auto-concept*, TNO-INRO, Delft (samenvatting van het rapport op: www.inro.tno.nl/sv/rapporten/samenvatting_urbanCAR.pdf)
- Troelstra, W.P. (1999) *Transport zonder broeikasgassen; stand van zaken*, NOVEM, Utrecht, september 1999
- UNDP (2000) *World Energy Assessment: energy and the challenge of sustainability*, United Nations Development Programme, New York, September 2000
- VES (2001) *Zweiter Bericht der Task-Force and das Steering Committee*, Verkehrswirtschaftliche EnergieStrategie (VES), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin
- Weiss, M.A., J.B. Heywood, E.M. Drake, A. Schafer, F.F. AuYeung (2000) *On the road in 2020; a life-cycle analysis of new automobile technologies*, Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
- Wit, P. de (2002) Krijtstreep-zonnecel, *Shell Venster*, september/oktober 2002, pp. 5-9

BIJLAGE 1 VERZENDLIJST

- 1 DGM, Directie Strategische Planning
- 2 Directeur-Generaal Milieubeheer, Ir. J. van der Vlist

- 3 Prof. Dr P. Nijkamp - NWO
- 4 Prof. Dr P. Rietveld - Vrije Universiteit Amsterdam
- 5 Prof. Dr F. den Butter - Vrije Universiteit
- 6 Prof. Dr F.M. Dieleman – Universiteit Utrecht
- 7 Prof. Dr. G.P. van Wee - Technische Universiteit Delft
- 8 Prof. Dr P.H.L. Bovy - Technische Universiteit Delft
- 9 Prof. Dr A.I.J.M. van der Hoorn - Universiteit van Amsterdam/ AVV
- 10 Prof. Dr F. le Clercq, Universiteit van Amsterdam/Twijnstra Gudde
- 11 Prof. Dr M. van Maarseveen - Universiteit Twente
- 12 Prof. Ir F. Sanders - Technische Universiteit Delft
- 13 Prof. Dr Ir H. Priemus - Technische Universiteit Delft/OTB
- 14 Prof. Dr Ir R.E.C.M. van der Heijden – Katholieke Universiteit Nijmegen
- 15 Prof. Dr H.J. Meurs – Katholieke Universiteit Nijmegen/MuConsult
- 16 Prof. Dr H.J. van Zuylen - Technische Universiteit Delft
- 17 Prof. Dr. Ing. K.W. Axhausen – ETH Zürich

- 18 Dr. C.M. Plug – VROM/DGM
- 19 Ir A.J. Baayen - VROM/DGM
- 20 Drs H.C.G.M. Brouwer - VROM/DGM
- 21 Ir M. van den Berg - VROM/DGM
- 22 Drs. R. Bouman – VROM/DGM
- 23 Dr C. Havenith - VROM/DGM
- 24 Dhr H. Baarbé – VROM/DGM
- 25 Ing. D. de Jong – VROM/DGM
- 26 Mr M.C. Kroon – VROM/DGM
- 27 Drs. F. Vlieg – VROM/DGM
- 28 Dhr B. van Engelenburg – VROM/DGM
- 29 Drs. A.J. van Marlen – VROM/DGM
- 30 Drs. P. Hofmeijer – VROM/DGM
- 31 Dr. J.F.M. van der Waals – VROM/DGM
- 32 Drs P. Godfroij – VROM/DGM
- 33 Drs R. Braakenburg van Backum - V&W
- 34 Ir A.N. Bleijenberg – V&W
- 35 Mw. Ir. A. van den Bosch – V&W/DGG
- 36 Dhr. H. Kraaij – V&W/DGG
- 37 Dhr. J. Kolpa – V&W/DGG
- 38 Drs K.J. Wulffraat – V&W/DGG
- 39 Drs H.W.E. Vroon – V&W/DGG
- 40 Mw. Ir. A.T. Ahlers – V&W/DGG

- 41 Drs J.C.G. Kampfraath – V&W/DGG
42 Mr ing. A.P. Burgel – V&W/DGG
43 Drs A.G. Th. Hablé – V&W/DGP
44 Ir L. van Asperen – V&W/DGP
45 Drs R. Smaak – V&W/DGP
46 Dhr H. Besseling – RWS-AVV
47 Ir P.C.M. Polak – RWS-AVV
48 Mevr. J. Veurman – RWS-AVV
49 Ing. J.A.P. Klein – CBS
50 Ir J.J.E.A van Meel – NOVEM
51 Dhr. E.J.M.T. van den Heuvel – NOVEM
52 Dhr. R. Hoogma – NOVEM
53 Ir. M.G.M. Harmelink – Ecofys
54 Dr C.A. Hendriks – Ecofys
55 Ir P. Kroon – ECN
56 Drs A.T.J. Groot – ECN
57 Dhr E. van Thuijl – ECN
58 Ir J.T.J. Fransen – SNM
59 Dhr J. Vis – SNM
60 Dhr M. van Walwijk – Innas Breda
61 Drs A. Mesker – VNO/NCW
62 Ir P.H.R. Langeweg – ANWB
63 Drs D. van der Burg – ANWB, Redactie verkeerskunde
64 Dhr L. van Kelegom – ANWB, Afdeling Algemeen Ledenbelang
65 Dhr C. Pereboom – RAI vereniging
66 Dhr W. Zijlstra – BOVAG
67 Ing. N.L.J. Gense – TNO-WT
68 Dr R.T.M. Smokers – TNO-WT
69 Dhr A.J.J. Dijkhuizen – TNO-WT
49 Ir J.H.J. Hulskotte – TNO-MEP
70 Dr Ir B.J.M. Rutten – CMG
71 Ing. P.M. Peeters – Peeters advies
72 Ir C. Harders – TRANSEK (Zweden)
73 D.H.W.H. Hermans – Goudappel Coffeng
74 J.T. Jetten – NEA
75 Drs. L. van der Velde – NEA
76 Ir J.M.W. Dings – CE
77 Ir P. Janse – CE
78 Mw. B. Kampman – CE
79 Ir P.M. Schrijnen – TUD
80 Dhr. P. Poppink – TLN
81 Dhr. J. van der Steen – VNPI
82 Dr M. Dijst – Universiteit Utrecht
83 Dhr M. Hekkert – Universiteit Utrecht
84 Depot van Nederlandse Publikaties. Afdeling Aquisitie

-
- 85 Nederlands Instituut voor Wetenschappelijke Informatiediensten
86 Bibliotheek VU
87 Bibliotheek UvA
88 Bibliotheek Faculteit der Economische Wetenschappen en Econometrie – UvA
89 Bibliotheek SEO
90 Bibliotheek RPD
91 Bibliotheek V&W
92 Bibliotheek AVV
93 Bibliotheek TU Delft
94 Bibliotheek TU Eindhoven
95 Bibliotheek TU Twente
96 Bibliotheek RUU
97 Bibliotheek KUN
98 Bibliotheek NHTV
99 Connekt
100 Directie RIVM
101 Ir F. Langeweg
102 Dr M.A.J. Kuijpers-Linde
103 Drs R.J.M. Maas
104 Drs J.A. Annema
105 Drs Ing. K.T. Geurs
106 Drs H. Nijland
107 Drs A. Hoen
108 Drs J.A. Oude Lohuis
109 Drs A. Gijsen
110 Mw. Drs M. Hoogwijk
111 Dr J.C.M. Farla
112 Drs D.P. van Vuuren
113 Ir G.J. van den Born
114 Drs H.A.R.M. van den Heiligenberg
115 Drs J.P.M. Ros
116 Auteur
117 SBC/Communicatie
118 Bibliotheek RIVM
119 Bureau Rapportenregistratie
120-124 Bureau Rapportenbeheer

125-155 Reserve-exemplaren

BIJLAGE 2 BIOMASSA

Deze factsheet geeft de achtergrondinformatie bij de kentallen zoals gebruikt in het hoofdrapport. Het betreft achtergrondinformatie over:

- beschikbaarheid van biomassa voor energieproductie;
- de beschikbaarheid van organische reststromen voor energieproductie;
- het energiegebruik ten behoeve van de productie van biomassa;
- N₂O-emissie door teelt van biomassa;
- de prijs van biobrandstoffen.

Beschikbaarheid van biomassa - literatuuroverzicht

De schattingen voor de maximale hoeveelheid biomassa lopen sterk uiteen van circa 50 tot 1000 EJ (ExaJoules = 10¹⁸ Joules = 1000 PJ). De bovengrens komt overeen met ruim 2 maal het mondiale primaire energiegebruik in 2000 (circa 430 EJ). Meer realistische inschattingen liggen tussen de 200 en 700 EJ (Faaij *et al.*, 2000a), hetgeen overeenkomt met 45 tot 160% van het mondiale primaire energiegebruik in 2000. Opbrengsten in de orde van honderden EJ kunnen alleen bij drastische veranderingen worden gerealiseerd. Om conflicten tussen biomassaproductie en de voedselvoorziening te voorkomen is namelijk op mondiale schaal intensivering van de landbouw nodig om de landbouwopbrengsten per hectare te laten toenemen. Deze intensivering zou met name in de ontwikkelingslanden moeten plaatsvinden en in hoeverre dit haalbaar is, is omstrede (Spakman *et al.*, 2001).

Berndes *et al.* (2002) hebben een uitgebreide review gedaan van 17 studies die het mondiale potentieel van biomassa voor energie als onderwerp hebben. Berndes *et al.* maken onderscheid naar energieteelt (biomassa plantages) en naar het gebruik van houtafval. De inschattingen in de 17 studies voor de energetische opbrengst van energieteelt lopen uiteen van 47 tot 238 EJ per jaar in 2050. De grote bandbreedte wordt veroorzaakt doordat het beschikbare areaal voor energieteelt en de opbrengst per hectare zeer onzeker zijn. De geschatte jaarlijkse opbrengst van biomassa uit bossen verschilt sterk tussen de gereviewde studies. De meest optimistische studie schat deze opbrengst op 115 EJ per jaar terwijl andere meer pessimistische studies de opbrengst als gering kwalificeren. De oorzaak voor deze verschillen is dat de pessimistische studies het beschikbare houtafval koppelen aan de industriële vraag naar hout, en deze is relatief gering. De optimistische studie heeft dit niet als restrictie. De totale mondiale hoeveelheid jaarlijks voor energieproductie beschikbare biomassa (zowel energieteelt als residuale biomassa) ligt volgens de 17 gereviewde studies tussen de 50 en 450 EJ in 2050.

Beeldman *et al.* (2000) schatten in dat het maximale aandeel van biobrandstoffen in de energie-opwekking in 2030 15-30% van het Nederlandse energiegebruik bedraagt. Wanneer de hiervoor benodigde biomassa alleen in Nederland zou moeten worden verbouwd is 150-300% van het huidige Nederlandse landbouwareaal nodig. Bij opschaling naar de EU-15 is 70% van het bestaande landbouwareaal nodig om 30% van het energiegebruik in de EU-15 in 2030 te vervangen door in de EU-15 geproduceerde biobrandstoffen. Op wereldschaal is

10% van het bestaande mondiale akker- en graslandareaal nodig om 30% van het mondiale fossiele energiegebruik in 2030 te vervangen door biobrandstoffen. Om 100% van het mondiale fossiele energiegebruik te vervangen door biobrandstoffen is dus 30 tot 35% van het beschikbare akker- en graslandareaal nodig. Het feit dat in sommige gebieden van de wereld het beschikbare landbouwareaal niet kan voorzien in de benodigde voedselproductie, maakt dat een 100% vervanging door biobrandstoffen in 2030 in de praktijk alleen mogelijk zal kunnen zijn indien het akker- en grasareaal wordt uitgebreid (ten koste van ander areaal) of de landbouwopbrengsten per hectare worden vergroot. Op langere termijn, wanneer zowel de benodigde voedselproductie als het mondiale energiegebruik verder zijn toegenomen, zal de maximaal mogelijke vervanging door biobrandstoffen kleiner zijn.

Volgens de Europese Commissie wordt het maximum percentage van het huidige benzine- en diesilverbruik dat door biobrandstoffen kan worden vervangen gewoonlijk geschat op 8%. Dit percentage kan worden bereikt indien de productie van biobrandstoffen wordt beperkt tot 10% van de landbouwgrond (Europese Commissie, 2002).

In Hall *et al.* (1993) is een inschatting gedaan voor het Europese en mondiale potentieel van organisch afval en energieteelt voor energetische doeleinden (zie Tabel 16).

Tabel 16 Theoretisch beschikbare hoeveelheid residuale biomassa voor energetische doeleinden en opbrengst van energieteelt (EJ)

regio	totaal primair energiegebruik in 1990	residu biomassa uit:			totaal	biomassa plantages ^{b)}	totaal biomassa	aandeel bio-massa
		landbouw	bosbouw	veeteelt ^{a)}				
Europa	76	1,3	2,0	0,5	3,8	11,4	15,2	20%
wereld	379	12,5	13,6	5,2	31,2	266,9	298,1	79%

a) mest

b) uitgaande van een opbrengst van 15 ton per hectare, een energie-inhoud van 20 GJ/ton en het gebruik van 10% van het beschikbare landbouw-, bos- en weideland areaal (totaal 890 miljoen hectare).

bron: Hall *et al.* (1993), IIASA/WEC (1998)

Uit Tabel 16 blijkt dat de in Europa beschikbare hoeveelheid organisch afval vermeerderd met opbrengst van de biomassateelt op 10% van het beschikbare land- en bosareaal gelijk is aan 20% van het Europese primaire energiegebruik in 1990. Op mondiale schaal is dit totaal gelijk aan 80% van het primaire energiegebruik in 1990. Let wel: het gaat hier om het primair energiegebruik in 1990. Vergeleken met het verwachte energiegebruik in 2050 (circa 840 EJ) is het potentieel van biomassa circa 35%.

Het in 2000 verschenen World Energy Assessment van de UN en het World Energy Council heeft berekend dat de totale hoeveelheid biomassa die mondiaal kan worden geproduceerd in 2050 tussen de 275 en 450 EJ bedraagt (UNDP, 2000). De UN en de WEC zijn daarbij uitgegaan van een areaal van circa 1,3 mld hectare, hetgeen gelijk is aan circa 25% van het mondiale landbouwareaal.

Als laatste wordt een studie door Concawe aangehaald (Armstrong *et al.*, 2002). Armstrong *et al.* geven aan dat de hoeveelheid beschikbaar areaal in de EU-15 circa 5-6 mln hectare

bedraagt hetgeen maar 4% is van het totale landbouwareaal in de EU-15 (circa 150 mln hectare). In totaal kan met dit oppervlak volgens Concawe maar 0,6% van het aardoliegebruik in de EU-15 (27 EJ/jaar) worden gesubstitueerd door biobrandstoffen. Vergeleken met het totale fossiele energiegebruik in de EU-15 (circa 55 EJ/jaar) is de substitutie door biobrandstoffen nog geringer, circa 0,3%. De inschatting van Concawe is ongeveer een factor 6 lager dan Beeldman *et al.* (1999) die hebben berekend dat met 70% van het landbouwareaal ongeveer 30% van het fossiele energiegebruik in de EU-15 kan worden gesubstitueerd. De voornaamste reden blijkt te zijn dat Concawe uitgaat van zeer lage biomassa-opbrengsten per hectare van 1,3 ton/hectare voor koolzaad, terwijl in de literatuur opbrengsten worden gevonden tussen 7 en 10 ton koolzaad per hectare.

Beschikbaarheid van biomassa uit energieteelt: berekening

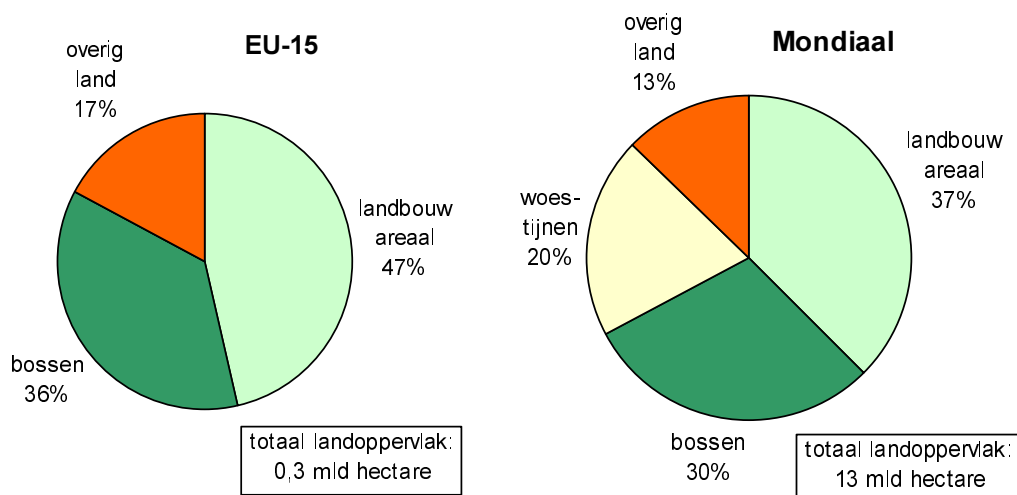
Het potentieel van biomassa uit energieteelt is afhankelijk van:

- beschikbaar areaal voor energieteelt;
- biomassa-opbrengst per hectare;

Beschikbaar areaal

De bruto hoeveelheid biomassa die kan worden geproduceerd (energieteelt) is afhankelijk van het voor biomassaproductie beschikbare areaal. In onderstaande figuur staan de aandelen van de verschillende typen bodemgebruik in het totale mondiale landoppervlak (13 mld hectare). In Figuur 3 is te zien dat het landbouwareaal (akkers en weilanden) circa 35% uitmaakt van het mondiale landoppervlak. Op Europese schaal (EU-15) is dit circa 45%. Het percentage bosareaal is mondiaal gelijk aan circa 30%. In de EU-15 is dit circa 35%.

De belangrijkste beperkingen voor het voor energieteelt beschikbare areaal zijn de concurrentie met voedselproductie en de bedreiging van de biodiversiteit (het voortbestaan van soorten). Omdat binnen de begeleidingsgroep bij deze studie consensus bestond dat het gebruik van bestaande bossen vrijwel zeker een aantasting van de biodiversiteit zal betekenen wordt in het vervolg van dit rapport verondersteld dat alleen het landbouwareaal in potentie kan worden aangewend voor de teelt van biomassa.



Figuur 3 Aandelen van grondgebruik, EU-15 en mondiaal

De mate waarin de energieteelt concurreert met voedselproductie is sterk afhankelijk van veronderstellingen over 1) de bevolkingsgroei, 2) het toekomstig voedseldieet en 3) de landbouwopbrengst per hectare. Volgens Faaij *et al.* (2000a) zal in 2050, uitgaande van een wereldbevolking van 9,4 miljard mensen, het voor voedselproductie benodigd areaal afhankelijk van het voedseldieet en de toekomstige landbouwopbrengsten, 1 tot 5 miljard hectare bedragen. Dit is 20 tot 100% van het mondiale landbouwareaal. Daarnaast is volgens Faaij *et al.* nog eens 0,4 – 0,8 miljard hectare nodig voor de productie van materialen als papier, hout en karton. Per saldo blijft 0 tot 3,6 miljard hectare over voor energieteelt hetgeen 0 tot 70% van het landbouwareaal vertegenwoordigt. De verwachting is wel dat dit resterende areaal voor een belangrijk deel bestaat uit gedegradeerde landbouwgronden ('uitgeputte' landbouwgronden). Volgens ECN (Menkveld, 2002) is er wereldwijd 0,75 miljard hectare aan gedegradeerde gronden (15% van het totale mondiale landbouwareaal). Volgens UNDP (2000) is alleen in ontwikkelingslanden al circa 2 miljard hectare aan gedegradeerde landbouwgronden. Deze gedegradeerde gronden zijn nog wel geschikt voor herbebossing echter de opbrengst per hectare zal maar 30 tot 40% bedragen van de opbrengst van niet-gedegradeerde landbouwgronden (Menkveld, 2002). Volgens Hall *et al.* (1993) geeft als 'ambitieuze maar niet onmogelijke schatting' dat rond 2050 10% van het huidige totale landbouw- en bosoppervlak in gebruik zou kunnen zijn voor energieteelt. Van die circa 900 miljoen hectare ligt circa 500 miljoen hectare in ontwikkelingslanden. Dat dit niet te ambitieus wordt door Hall *et al.* (1993) bewezen met het gegeven dat in deze drie werelddelen ruim 400 tot 750 miljoen hectare gedegrademd landareaal aanwezig is dat theoretisch voor herbebossing kan worden gebruikt.

Het is dus moeilijk eenduidig vast te stellen hoeveel procent landbouwareaal in 2050 maximaal ter beschikking zou kunnen staan voor energieteelt. Enigszins arbitrair wordt in dit rapport uitgegaan van een aandeel van 10% van het landbouwareaal (= circa 500 miljoen hectare). Dit percentage is zowel gehanteerd door Hall *et al.* (1993) als door de Europese Commissie bij de totstandkoming van het voorstel voor de 'Richtlijn tot bevordering van het gebruik van biobrandstoffen' (Commissie van de Europese Gemeenschappen, 2001).

Daarmee is niet zeker dat deze hoeveelheid landbouwareaal op lange termijn inderdaad kan worden aangewend voor biomassateelt zonder dat de voedselproductie in het geding komt of de biodiversiteit wordt aangetast.

Gesteld wordt dus dat in 2050 maximaal 10% van het mondiale landbouwareaal (akkers en weilanden) kan worden aangewend voor energieteelt.

Bruto opbrengst per hectare

Tabel 17 geeft een overzicht van de in de literatuur gevonden informatie over de opbrengst biomassa per hectare voor de verschillende hoofdgroepen biomassa.

Tabel 17 Massa-opbrengst per hectare (in ton droge biomassa per hectare), energie-inhoud van biomassa en energetische opbrengst per hectare (GJ/hectare)

	Johansson (1996)	De Jager <i>et al.</i> (1998)	Faaij <i>et al.</i> (2000b)	bandbreedte
[ton droge stof/hectare]				
cellulose ^{a)}	17	9–16	10–15	9 – 17
tarwe/graan ^{b)}	8 / 10	7–10 / 2–17		7 – 17
suikerbieten	-	16–21	14–20	14 – 21
koolzaad ^{b)}	3 / 5	3–5 / 7–10	3–4 / 6–9	3 – 10
[GJ/ton droge stof]				
cellulose	16	18 – 19	19	
tarwe/graan ^{b)}	15	17 / 16	-	
suikerbieten	-	19	19	
koolzaad ^{b)}	26 / 22	28 / 20–21	28 / 21–22	
[GJ/hectare] ^{c)}				
cellulose	270	162 – 288	190 – 285	162 – 288
tarwe/graan	112 – 140	119 – 275	-	112 – 275
suikerbieten	-	296 – 381	266 – 380	266 – 381
koolzaad	79 – 108	83 – 213	81 – 182	79 – 213

a) houtachtige biomassa, bijvoorbeeld eucalyptus, populier en wilg

b) linker waarde: zonder gebruik bijproducten; rechter waarde: met gebruik bijproducten

c) lage waarde: ondergrens opbrengst * ondergrens energie-inhoud en geen gebruik bijproducten; hoge waarde: bovengrens opbrengst * bovengrens energie-inhoud en wel gebruik bijproducten.

Uit Tabel 17 blijkt dat de opbrengst van koolzaad het laagst is in vergelijking tot de andere biomassasoorten. De energetische opbrengst per hectare van suikerbieten is het hoogst.

Organische afvalstromen

Organische afvalstromen die kunnen worden aangewend voor de productie van brandstoffen of elektriciteit zijn onder andere residuen uit de voedselteelt (bijvoorbeeld stro bij graanproductie), residuen uit de bosbouw, afvalhout, organische fractie uit huishoudelijk afval, mest en rioolslib). Niet al deze residuen kunnen worden aangewend voor energetische doeleinden omdat het bijvoorbeeld economisch onaantrekkelijk is of omdat het organische materiaal nodig is om het land te bemesten of tegen erosie te beschermen (Hall *et al.*, 1993). Ook zijn er grote verschillen tussen de residuen onderling voor wat betreft energie-inhoud en de geschiktheid voor omzetting naar brandstoffen. Het gaat in dit kader te ver om verschillende residuen afzonderlijk te bespreken. Deze paragraaf geeft daarom een grove indicatie voor de potentie van het ‘gemiddelde’ organische afval om fossiele energie te

vervangen. Een Belgische studie (Ampere, 2000) concludeert dat de in België vrijkomende organisch-afvalstromen en meststoffen theoretisch 5-10% van het elektriciteitsgebruik⁵ in België kunnen vervangen (circa 1 % van het totale finale energiegebruik in België). Voor de Nederlandse situatie schat ECN (1996) in dat biomassa-afval circa 100 PJ aan fossiele energie kan vervangen. Uitgaande van een groei van het Nederlandse energiegebruik met ongeveer een factor 2 ten opzichte van 1990 kan biomassa-afval in Nederland 1 tot 2% van het fossiele energiegebruik vervangen. Hall *et al.* (1993) hebben berekend dat de totale hoeveelheid organisch afval mondiaal circa 110 EJ bedraagt, maar dat daarvan ruim 60 EJ kan worden gebruikt om energie op te wekken. Dit is vergelijkbaar met circa 5 tot 10% van het geschatte mondiale primaire energiegebruik in 2050 (circa 850 EJ: IASA/WEC, 1998). Zou de biomassa volledig worden omgezet in bijvoorbeeld brandstoffen dan kan minder fossiele energie worden vervangen dan deze 5 tot 10% omdat het rendement van de omzetting van aardolie in benzine of diesel hoger is dan van biomassa in bio-brandstoffen.

De GRAINS-studie schat op basis van een uitgebreide literatuurreview in dat de mondiale hoeveelheid biomassa-afval 40 – 230 EJ bedraagt (Faaij *et al.*, 2000a). Dit is 5 – 25% van het geschatte mondiaal primair energiegebruik in 2050. De hoge schatting in de GRAINS-studie is het theoretisch of technisch potentieel van afvalstromen waarbij geen rekening is gehouden met bijvoorbeeld het feit dat mest niet voor 100% kan worden gebruikt voor energieproductie maar ook nodig is voor de bemesting van gronden. Ook is geen rekening gehouden met praktische problemen om de afvalstromen in te zamelen en het energiegebruik dat dat met zich mee brengt.

In het vervolg van deze studie wordt verondersteld dat de hoeveelheid voor energetische doeleinden beschikbare organische afval- en meststoffen een energie-inhoud heeft die overeenkomt met 1-10% van het mondiaal primaire energiegebruik. Op EU-schaal is de hoeveelheid beschikbaar organisch afval en mest vermoedelijk vergelijkbaar met de schattingen voor België en Nederland, dus circa 1-2% van het primaire energiegebruik in de EU. Deze bandbreedte wordt gebruikt in de verdere berekeningen.

Energiegebruik door productie van biomassa

Tabel 18 geeft een overzicht van de in de literatuur aangetroffen kentallen voor het energiegebruik ten behoeve van de productie van biomassa. Het betreft vermoedelijk alleen het directe energiegebruik van de inzet van landbouwmachines. Met het indirecte energiegebruik ten gevolge van de productie van de gebruikte kunstmest en bestrijdingsmiddelen is geen rekening gehouden.

⁵ Het aandeel van elektriciteit in het finale energiegebruik in België is circa 15% (MinEco, 2002)

Tabel 18 Overzicht van het energiegebruik ten gevolge van de productie van biomassa (per eenheid geproduceerde biomassa)

[GJ/GJ biomassa]	IEA/AFIS (1996)	IEA/AFIS (1999)	Novem (1999b)	Johansson (1996)	De Jager <i>et al.</i> (1998)	Faaij <i>et al.</i> (2000b)	band- breedte
cellulose	0,02 – 0,04	0,03 – 0,09	0,06	0,03	0,02 – 0,05	0,02 – 0,03	0,02 – 0,09
tarwe/graan	0,14	0,10 – 0,13	-	0,09 – 0,10	0,04 – 0,10	-	0,04 – 0,14
suikerbieten	0,10	-	0,13	-	0,03 – 0,05	0,03 – 0,05	0,03 – 0,13
oliehoudend zaad	0,12	0,17 – 0,23	0,29	0,09 – 0,12	0,05 – 0,14	0,11 – 0,14	0,05 – 0,29

Uit de literatuur blijkt dat voor de productie van houtachtige biomassa (cellulose) per GJ biomassa circa 0,02 - 0,09 GJ aan primaire energie nodig (merendeel dieselbrandstof voor machines). Voor de productie van koolzaad, de grondstof voor biodiesel (KME), is circa 0,05 - 0,29 GJ primaire energie per GJ biomassa nodig. In het vervolg van dit hoofdstuk wordt alleen cellulose en oliehoudende zaad als primaire energiebron verder uitgewerkt omdat beide de bandbreedte bepalen van het potentieel van biomassa.

Wanneer wordt verondersteld dat de land- en bosbouwmachines, die worden gebruikt voor de productie van biomassa, biobrandstoffen gebruiken, komt netto minder biomassa beschikbaar voor de vervanging van fossiele brandstoffen. Verondersteld is dat het rendement van de omzetting van biomassa naar biobrandstoffen circa 55% bedraagt (NOVEM, 1999b).

N₂O-emissies door energieteelt

Er is nog geen rekening gehouden met de tijdens de teelt van biomassa optredende N₂O-emissie, hetgeen een circa 300 maal sterker broeikasgas is dan CO₂. De well-to-wheel reductie in broeikasgasemissies is door de N₂O-emissie lager dan de reductie in CO₂-emissies. Uit een recente studie door Concawe (Armstrong *et al.*, 2002) blijkt bijvoorbeeld dat wanneer N₂O-emissie buiten beschouwing wordt gelaten de reductie van broeikasgasemissies (dus alleen CO₂) bij de vervanging van fossiele diesel door koolzaadmethylester (biodiesel) circa 50% bedraagt. Wordt N₂O daarentegen wel meegenomen, dan is de reductie in broeikasgasemissies nog maar 10%. Ofwel 80% van de broeikasgasemissiereductie lekt weg door de N₂O-emissies bij biomassateelt. Lewandowski *et al.* (2000) meldt dat, in geval van de teelt van miscanthus (grassoort), maar 6% van de vermeden broeikasgasemissies weglekt door de N₂O-emissies uit gewassen. FAO (2001) geeft een N₂O-emissie per hectare biomassa van 1 tot 2 kg, afhankelijk van het type landbouwgrond en biomassa. Ervan uitgaande dat 0,5 miljard hectare landbouwgrond wordt ingezet voor biomassa-productie (zie Tabel 3) komt de N₂O-emissie als gevolg van energieteelt op 0,5 tot 1,0 miljard kg N₂O, hetgeen overeenkomt met 0,2 tot 0,3 Gton CO₂-equivalenten. Ter vergelijking: de totale vermeden CO₂-emissies door de vervanging van fossiele brandstoffen door bio-brandstoffen bedraagt naar schatting 2 tot 16 Gton. Ofwel: volgens de cijfers van FAO lekt maximaal circa 15% van de vermeden CO₂-emissies weg door de N₂O-emissies die optreden bij de teelt van biomassa.

Kosten van biobrandstoffen

Tabel 19 geeft de inschattingen voor de kosten van de productie en distributie ('well to tank') van brandstoffen. De veronderstellingen in de GAVE-studie (NOVEM, 1999b) zijn in Tabel 19 vergeleken met die in andere studies. Duidelijk is dat de inschattingen voor de kosten van biobrandstoffen, zelfs die voor fossiele brandstoffen, ver uit elkaar liggen. Mogelijke redenen voor de grote bandbreedtes zijn verschillen in veronderstelde conversietechnieken, in veronderstelde kostenreducties door schaalvergroting, in aannames over de toekomstige prijs van ruwe biomassa, in herkomst van biomassa (grondprijzen, kosten van vervoer van biomassa), et cetera. Alle in Tabel 19 geciteerde studies zijn het er wel over eens dat biobrandstoffen uit cellulose-houdende biomassa op lange termijn het goedkoopst is. Brandstoffen uit oliehoudende zaden, bijvoorbeeld koolzaadmethylester (KME), is volgens alle bronnen de duurste biobrandstof. Deze conclusie is gebaseerd op een recente studie in opdracht van het Duitse Umwelbundesamt waarin wordt geconcludeerd dat de prijs van een liter KME zelfs op lange termijn minimaal een factor 2 hoger zal blijven dan van fossiele diesel (Kraus *et al.*, 2000).

Tabel 19 Productiekosten van fossiele brandstoffen en biobrandstoffen/bio-elektriciteit (USD/GJ brandstof/elektriciteit) (well-to-fuel) op lange termijn

primaire energiebron	brandstof	NOVEM, (1999b) ('lange termijn')	IEA/AFIS (1996) ('lange termijn')	Johansson (1996) (voor 2015)	Faaij <i>et al.</i> (2000a) ('lange termijn')	De Jager <i>et al.</i> (1998) (voor 2010)	UNDP (2000) ('lange termijn')
aardolie	benzine	6	18	-	8	-	8 – 11
	diesel	6	16	-	-	-	8 – 11
	LPG	6	16	-	-	-	-
biomassa (cellulose)	ethanol	9 – 21	25	14 – 33	6	17	6 – 7
	methanol	13	17	15 – 20	10	19 – 20	7 – 10
	DME	12	19	-	-	-	-
	waterstof	19	22	15 – 19	10	17 – 18	6 – 8
	FT-diesel/ -benzine	19 – 22	-	-	10	-	-
	electriciteit	-	-	29	-	-	11 – 17 ^{a)}
biomassa (zetmeel/ suiker ^{b)})	ethanol	21	38	23 – 35	25	-	8 – 25 ^{c)}
biomassa (olieh. zaden)	biodiesel	23 – 57	30	23 – 41	20 – 25	24 – 40	15 – 25 ^{c)}
biomassa (alle soorten)		9 – 57	17 – 38	14 – 41	6 – 25	17 – 40	6 – 25

a) komt overeen met een elektriciteitsprijs van 0,04 – 0,06 USD/kWh

b) bijvoorbeeld graan, maïs, suikerriet, suikerbiet

c) waarden gelden voor korte termijn

Volgens De Jager *et al.* (1998) is de goedkoopste manier om in 2010 het fossiele energiegebruik te verminderen de omzetting van cellulose (in houtachtige gewassen) in ethanol te gebruiken in conventionele verbrandingsmotoren. De meerkosten ten opzichte van fossiele brandstoffen bedraagt circa 9 Euro per vermeden GJ fossiele energie (= circa 125 Euro/ton CO₂). De productie van biodiesel is met 22 Euro per vermeden GJ fossiele energie (circa 300 Euro/ton CO₂) aanzienlijk minder kosten-effectief. Wanneer bio-ethanol, bio-

methanol of bio-waterstof wordt toegepast in brandstofcellen kan de kosten-effectiviteit oplopen tot minder dan 5 Euro per vermeden GJ fossiele energie (circa 70 Euro/ton CO₂) (De Jager *et al.*, 1998). Op de lange termijn zijn volgens Faaij *et al.* (2000) brandstofcellen op waterstof of ethanol geproduceerd uit hout de goedkoopste oplossing, zelfs goedkoper dan interne verbrandingsmotoren op benzine. Op de korte termijn zijn synthetische brandstoffen (bijvoorbeeld Fischer-Tropsch) en methanol uit hout gecombineerd met interne verbrandingsmotoren veelbelovende opties.

In de GAVE-studie (NOVEM, 1999b) wordt een bandbreedte voor de kosten-effectiviteit van biobrandstoffen gegeven van 20-200 Euro/ton CO₂ voor biobrandstoffen die in de plaats kunnen komen van benzine en 100-350 Euro/ton CO₂ voor biobrandstoffen die in de plaats kunnen komen voor diesel.

BIJLAGE 3 CO₂-OPSLAG

Inleiding

Er zijn in essentie twee methoden om bij gebruik van fossiele brandstoffen de CO₂-emissies af te vangen. Bij de eerste methode, 'pre-combustion capture' genoemd, wordt de fossiele brandstof vergast en gesplitst in bijna puur CO₂ en waterstof (H₂). Deze methode wordt ook wel ontkolen of decarbonisation genoemd. Bij de andere methode, 'post-combustion capture' genoemd, wordt de fossiele brandstof in bijvoorbeeld een elektriciteitscentrale verbrand en wordt het CO₂ afgescheiden uit de rookgassen. Dit afvangen kan op verschillende wijzen gebeuren en tussen 85 en 95% van het CO₂ wordt uit het rookgas verwijderd (Hendriks *et al.*, 2002a). De CO₂ moet vervolgens worden gecomprimeerd en getransporteerd naar de locatie waar de CO₂ moet worden opgeslagen. De belangrijkste reservoirs om CO₂ in op te slaan zijn:

- uitgeputte olie- en aardgasvelden
- aquifers
- steenkoollagen
- oceanen

Uitgeputte olie- en aardgasvelden

Uitgeputte velden zijn beschikbaar om CO₂ in op te slaan. De capaciteit van de Nederlandse velden (uitgeput + nog niet uitgeput) wordt geschat op circa 12 Gton, hetgeen overeenkomt met 60 maal de jaarlijkse Nederlandse CO₂ in Nederland. De capaciteit van op dit moment (2000) uitgeputte gasvelden in Nederland is beperkt (circa 200 Mton). De komende decennia komen er weliswaar uitgeputte velden bij, maar de capaciteit in Nederland is in 2030 nog maar 1 à 2 Gton.

Geschat wordt dat de mondiale capaciteit van alle olie- en aardgasvelden circa 400 tot 3500 Gton (1 Gton = 1000 Mton) bedraagt (Hendriks *et al.*, 2002b). Aangezien de mondiale CO₂-emissie in 1990 circa 26 Gton bedroeg, correspondeert de opslagcapaciteit met 15 tot 135 jaar de mondiale CO₂-emissie.

Aquifers

Aquifers (watervoerende lagen) lijken geschikt voor het opslaan van de afgevangen CO₂, net als lege aardgasvelden. De velden zijn gasdicht. Turkenburg van de Universiteit Utrecht heeft berekend dat de totale opslagcapaciteit in Nederlandse aquifers 1 tot 40 Gton bedraagt, hetgeen overeenkomt met 5 tot 250 keer de Nederlandse CO₂-emissie in 1990. Voor de EU wordt de capaciteit in aquifers geschat op 800 Gton, overeenkomend met maximaal 250 jaar de CO₂-emissie in EU in 1990. Hendriks *et al.* (2002b) hebben berekend dat de capaciteit van aquifers mondiaal tussen 30 en 1100 Gton bedraagt, maar stellen dat wanneer de eisen aan de

veiligheid van opslag minder streng zouden zijn de capaciteit van aquifers vele malen hoger is.

Steenkoollagen

Door middel van het injecteren van CO₂ in steenkoollagen kan de in deze lagen aanwezige methaan worden verdrongen en opgevangen. Volgens Folkert (2000) vergt het verdringen van één molecuul methaan (CH₄) twee moleculen CO₂. Per saldo wordt met deze methode dus CO₂ opgeslagen terwijl het gewonnen aardgas bijvoorbeeld kan worden omgezet in waterstof en de CO₂ die daarbij vrijkomt kan worden opgeslagen. Volgens de TU Delft is de hoeveelheid methaan in Nederlandse steenkoollagen van dezelfde orde grootte als de hoeveelheid methaan in het Slochterenveld. Volgens Hamelinck *et al.* (2001) is de capaciteit van opslag van CO₂ in steenkoollagen circa 8 Gton hetgeen overeenkomt met 40 maal de jaarlijkse CO₂-emissie in Nederland. Daarnaast kan met het uit de steenkoollagen vrijkomende aardgas de Nederlandse energievoorziening gedurende 20 jaar worden geledigd. Volgens Hendriks *et al.* (2002b) bedraagt de mondiale capaciteit van steenkoollagen tussen de 0 en circa 1500 Gton.

Oceanen

In oceanen is naar schatting 10.000 Gton CO₂ opgelost. Ter vergelijking: de jaarlijkse mondiale CO₂-emissies uit fossiele brandstoffen bedraagt 25 Gton. De CO₂-concentratie in de atmosfeer is de laatste eeuw sterk toegenomen doordat fossiele brandstoffen in snel tempo zijn verbruikt. De concentratie zou nog meer zijn toegenomen als niet een deel van de vrijgekomen CO₂ zou zijn opgelost in oceanen.

In de oceanen is met name in de bovenste laag een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ opgelost. De onderste lagen bevatten relatief weinig CO₂ en hebben een grote CO₂-opslagcapaciteit. Er zijn in principe twee manieren om oceanen extra CO₂ te laten opnemen. De eerste methode is injecteren op 1 tot 3 kilometer zodat op grote diepte 'CO₂-meren' ontstaan. Aangezien CO₂ op deze diepte zwaarder is dan water, komt dit CO₂ niet meer aan de oppervlakte. De andere methode is het 'fertiliseren' van oceanen zodat de hoeveelheid organisch materiaal toeneemt en dit materiaal tijdens de groei meer CO₂ uit de atmosfeer onttrekt. Naar deze laatste methode is nog weinig onderzoek gedaan (IEA, 2002) (Folkert, 2000).

De mondiale capaciteit van CO₂-opslag in oceanen is in potentie honderden tot duizenden Gton CO₂, afhankelijk van de toelaatbare verzuring van de oceanen. IEA (2002) schat in dat, indien CO₂ lokaal in kleine hoeveelheden wordt geïnjecteerd, de verzuring tot een minimum beperkt blijft. De marine ecologie is echter slecht bestand tegen veranderingen in de zuurgraad. Het staat daarmee volgens de IEA nog niet vast dat zelfs een geringe daling van de pH-waarde niet tot significante effecten op de marine ecologie zal leiden.

Totale potentieel van CO₂-opslag

Tabel 20 geeft het totale potentieel van CO₂-opslag in uitgeputte gas- en olievelden, aquifers en oceanen. Uit Tabel 20 blijkt dat de capaciteit voor CO₂-opslag in het slechtste geval beperkt is tot 125 jaar wanneer 100% van de Nederlandse CO₂-emissie binnen Nederland zou moeten worden opgeslagen. De ondergrondse CO₂-opslag mondiaal (dus exclusief opslag in oceanen) is voldoende om gedurende maximaal circa 200 jaar de totale mondiale CO₂-emissie op te slaan. Wanneer ook opslag in oceanen als optie wordt meegenomen is de capaciteit nagenoeg oneindig.

Tabel 20 CO₂-opslagcapaciteit (Gton)

	mondiaal	Europa (EU)	Nederland
Olie- en gasvelden	446 – 3320	1 – 30	12
Aquifers	30 – 1081	15 – 800	1 – 40
Steenkoollagen	0 – 1480	?	8
Oceanen	$5 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^7$	-	-
Totale capaciteit (Gton CO ₂)			
inclusief oceanen	$5 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^7$	-	-
exclusief oceanen	476 – 5880		
CO ₂ -emissie in 1990	25 Gton	2,8 Gton	167 Mton
Totale capaciteit (CO ₂ -emissie in 1990 = 1)			
inclusief oceanen	200 tot ~2,5 mln	-	-
exclusief oceanen	18 tot 225	5 tot ~300	125 tot ~350

Bron: Folkert (2000), Hamelinck (2001), Hendriks *et al.* (2002b)

De eindige voorraden fossiele energie zijn in het geval van opslag in oceanen waarschijnlijk de beperkende factor als het gaat om duurzaamheid. Het ECN heeft in 2001 een inventarisatie gedaan van internationale studies over de huidige en verwachte wereldvoorraden fossiele energiebronnen (in: Algemene Energieraad, 2001). De olievoorraden zijn volgens deze prognoses gelijk aan circa 200 maal het huidige jaarlijkse mondiale olieconsumptie. Voor aardgas en steenkool is dit ook ongeveer 200 jaar. Met andere woorden: zelfs als de opslagcapaciteit van CO₂ oneindig zou zijn, dan zou bij de huidige en verwachte voorraden fossiele energie binnen tweehonderd jaar andere duurzame energiebronnen moeten worden aangesproken.

Veiligheidsrisico's

Er zijn verschillende veiligheidsrisico's verbonden aan CO₂-opslag, namelijk:

- breuk van de bovengrondse toevoerleidingen;
- ontsnappen van CO₂ uit de opslagvelden;
- CO₂-vervuiling van het grondwater
- seismische activiteit
- verzakking of stijging van het aardoppervlak

Aangezien CO₂ in hoge concentraties giftig is, zou het plotseling vrijkomen van grote hoeveelheden CO₂ tot levensbedreigende situaties kunnen leiden. Folkert (2000) concludeert

dat de veiligheidsrisico's van bovengronds CO₂-transport (onder hoge drukken) geen grote veiligheidsrisico's met zich mee brengt mits voldoende aandacht wordt geschonken aan ruimtelijke inpassing en veiligheidsmaatregelen. Ook het risico van het ontsnappen van CO₂ uit opslagvelden is volgens Folkert gering. De velden hebben immers ook gedurende miljoenen jaren aardgas vastgehouden. De risico's bij opslag in aquifers is groter dan bij opslag in gas- en olievelden maar nog steeds gering. Over de andere drie genoemde veiligheidsrisico's is nauwelijks iets bekend.

Maatschappelijk draagvlak

CO₂-opslag wordt niet door iedereen als een duurzame energiebron gezien. De mening van Greenpeace bijvoorbeeld is: "Opslag is een voorbeeld van het instandhouden van het probleem. Het opstoken van fossiele brandstoffen zou niet erg zijn als de overheid alles uit de kast haalde om reductie voor elkaar te krijgen. Maar dat is niet zo: CO₂ wordt niet structureel aangepakt in het energiebeleid. Er wordt geen trendbreuk geforceerd met off shore windenergie, met het stoppen van kolengestookte elektriciteitscentrales, het stimuleren van zonne-energie. Als dat allemaal wél zou gebeuren, zou CO₂-opslag als tijdelijke maatregel veel aanvaardbaarder zijn, als 'eerste hulp' aan het klimaat"⁶.

Ook een voorgenomen proef in Noorwegen om CO₂ op 800 meter diepte in de oceaan te injecteren heeft geleid tot protesten van de milieubeweging evenals een eerder proefproject in Hawaii (ENDS, 2002). De milieugroeperingen beschouwen CO₂-opslag als dumpen van afval en zijn bang dat CO₂-opslag de aandacht zal afleiden van initiatieven voor hernieuwbare energie en er minder geld beschikbaar is om in hernieuwbare energie te investeren.

Het Wereldnatuurfonds (WNF) is bij monde van Sible Schöne de mening toegedaan dat 'CO₂-opslag nodig is omdat energiebesparing en de introductie van duurzame energie niet genoeg zoden aan de dijk zetten. Verder vind WNF dat 'het einddoel van CO₂ de overgang naar een waterstofeconomie moet zijn'. Waterstof kan immers worden geproduceerd uit zowel biomassa, hernieuwbare energie (zon/wind/water) als fossiele energie. Lucas Reijnders van Stichting Natuur en Milieu waarschuwt dat 'CO₂-opslag niet zonder risico's is omdat er veel druk op de bodem komt en er lekkages kunnen optreden'.

CO₂-emissies

Bij de omzetting van fossiele brandstoffen in waterstof of elektriciteit en gelijktijdige afvang, transport en opslag van de daarbij vrijkomende CO₂, vinden wel degelijk CO₂-emissies plaats. Ten eerste kan veelal niet 100% van de CO₂ worden afgevangen en bovendien kost compressie en transport van CO₂ energie. Volgens Hendriks *et al.* (2002a) kost de compressie van CO₂ 0,4 MJe per kg CO₂ en het transport 0,5 kJe per kg CO₂ per getransporteerde kilometer. Het energiegebruik voor CO₂-opslag is volgens Hendriks *et al.* niet significant. Voor de energieketen waarin kolen worden omgezet in waterstof en de CO₂ wordt opgeslagen in lege aardgasvelden, berekenen Hendriks *et al.* een netto CO₂-emissie van circa

25 - 45 kg per GJ waterstof(uitgaande van transport van CO₂ over 100 km). Voor de energieketen waarin aardgas wordt omgezet in waterstof en de afgevangen CO₂ wordt opgeslagen in steenkoollagen, bedraagt de netto CO₂-emissie ongeveer 15 - 25 kg CO₂ per GJ waterstof. Ter vergelijking: per GJ benzine of diesel komt in de hele energieketen circa 80 kg CO₂ vrij.

Kosten

De kosten van CO₂-opslag in de industrie bedragen tussen de 11 en 21 Euro per ton CO₂, ervan uitgaande dat de CO₂ in pure vorm beschikbaar komt en on-shore in aquifers kan worden opgeslagen (ECN/RIVM, 1998). De kosten voor CO₂-afvang bij elektriciteitscentrales zijn volgens ECN/RIVM (1998) aanzienlijk hoger doordat de CO₂ niet in pure vorm beschikbaar komt maar moet worden afgescheiden uit een gasmengsel. De kosten bedragen voor nieuwe gasgestookte centrales circa 40 Euro/ton CO₂. Shell schat in dat met de huidige technologie de CO₂-opslag bij elektriciteitscentrales tussen de 35 en 85 Euro/ton CO₂ kost (Clemens en Wit, 2001). Hendriks *et al.* (2002a) schatten de kosten voor CO₂-afvang en –compressie tussen 35 en 45 Euro/ton CO₂. De transportkosten bedragen volgens Hendriks *et al.* (2002a) tussen de 2 en 6 Euro/ton CO₂, uitgaande van een transportafstand van 100 km. Hogere afstanden leiden uiteraard tot hogere kosten. De totale kosten komen daarmee op 35 tot 50 Euro/ton CO₂. De IEA schat in dat de kosten van CO₂-opslag in oceanen circa 50-60 Euro/ton CO₂ bedragen. Het grootste deel hiervan, 30-50 Euro/ton CO₂, betreft de afvang van CO₂ bij elektriciteitscentrales (IEA, 2002).

Volgens Ecofys (Hendriks *et al.*, 2002a) bedragen de kosten van de productie van waterstof uit aardgas of kolen gecombineerd met CO₂-opslag in steenkoollagen of lege aardgasvelden tussen 13 en 16 €/GJ geproduceerde waterstof. Wanneer uit aardgas of kolen elektriciteit wordt gemaakt en de CO₂-wordt opgeslagen (post-combustion capture) kost de elektriciteit tussen de 0,05 tot 0,11 €/kWh (= 14 – 31 €/GJ_e elektriciteit) (Hendriks *et al.*, 2002a).

De totale kosten per ton opgeslagen CO₂ zijn niet gelijk aan de kosteneffectiviteit van waterstof- of elektriciteitsproductie uit fossiele brandstoffen met CO₂-opslag. Dit omdat de het scheiden van fossiele brandstoffen in waterstof en CO₂, het comprimeren en transporteren van CO₂ fossiele energie kost, hetgeen tot CO₂-emissies leidt. Per saldo schatten Hendriks *et al.* (2000a) dat de kosteneffectiviteit van waterstofproductie uit aardgas of kolen met CO₂-opslag in aardgasvelden of steenkoollagen, tussen de 150 en 250 Euro/ton vermeden CO₂-emissie bedraagt (in vergelijking tot toepassing van aardgas). De productie van elektriciteit uit kolen waarbij de CO₂ deels wordt geleverd aan kassen en deels wordt opgeslagen is aanzienlijk kosteneffectiever als het gaat om CO₂-emissiereductie, tussen 15 en 30 Euro/ton vermeden CO₂-emissie (in vergelijking tot huidige gemiddelde aardgasgestookte elektriciteitscentrale in Nederland).

BIJLAGE 4 ENERGIE UIT ZON, WIND OF WATER

Windenergie

Op 1 januari 2001 stonden er in Nederland on-shore ruim 1300 windturbines met een gezamenlijk vermogen van bijna 500 MW. Volgens ECN/RIVM is het potentieel van windenergie in Nederland in 2010 circa 4000 MW on-shore en nog eens 2000 MW off-shore. Dit komt ongeveer overeen met 3 – 4 Mton CO₂. Op de lange termijn is het technisch potentieel vele malen groter. In theorie kan bijvoorbeeld off-shore per 1000 vierkante kilometer ongeveer 1000 MW aan windenergie worden gegenereerd⁷. Dit komt overeen met circa 8 PJ hetgeen gelijk is aan 0,6 Mton CO₂.

Een studie door de Duitse auto- en olie-industrie in samenwerking met het Duitse Ministerie van Verkeer (VES, 2001) schat het potentieel van on- en off-shore windenergie in Duitsland in 2010 op circa 8 – 9% van totale energiegebruik door de sector transport, wanneer 50% van het totale potentieel wordt ingezet om waterstof voor de sector verkeer te produceren. Op EU-schaal schat deze studie dat het potentieel van on- en off-shore windenergie in 2010 20-25% bedraagt, wederom onder de aanname dat 50% van het beschikbare potentieel ten goede komt aan de sector transport. Aangezien het aandeel van de sector transport in de totale CO₂-emissie in de EU-15 in 1998 maar circa 25% bedroeg, wordt in de VES-studie de beschikbare windenergie meer dan evenredig aan de sector transport beschikbaar gesteld. Wanneer de beschikbare windenergie evenredig over alle sectoren zou zijn verdeeld bedraagt het potentieel van windenergie in de EU 10 tot 12% bedragen van het totale energiegebruik in de EU.

De UN schat in dat het technisch potentieel van off-shore windenergie in Europa groter is dan het totale elektriciteitsgebruik in Europa (UNDP, 2000). Volgens de EEA (2002) bedraagt de totale elektriciteitsproductie in de EU-15 in 1999 circa 2500 TWh (circa 9 EJ). Grubb en Meyer (1993) schatten in dat in West-Europa on-shore ongeveer 4800 TWh aan elektriciteit kan worden opgewekt.

Het mondiale potentieel van on-shore windenergie schatten Grubb en Meyer (1993) in op circa 53.000 TWh. Dit komt overeen met circa 380 EJ primaire energie, uitgaande van een elektriciteitcentralepark met een gemiddeld rendement van 50%. Het mondiale primaire energiegebruik bedraagt in 2050 tussen de 600 en 1050 EJ (IIASA/WEC, 1998). UNDP (2000) schat in dat het theoretisch potentieel van windenergie mondiaal gelijk is aan ongeveer 1800 EJ. Hierbij is verondersteld dat circa 25% van het landoppervlak is aan te wenden voor opwekking van windenergie. Het technisch potentieel van on-shore windenergie bedraagt volgens het UNDP tussen de 20.000 en 50.000 TWh aan elektriciteit per jaar. Hiervoor zou circa 150 - 350 EJ aan fossiele energie nodig zijn geweest, wederom uitgaande van een elektriciteitcentralepark met een gemiddeld rendement van 50%. Dit is circa 20 tot 40% is van het mondiale primaire energiegebruik in 2050. Daarnaast is er nog een groot

⁷ Mondelinge mededeling van Jan Spakman (RIVM) op 16 mei 2002

potentieel voor off-shore windenergie. In totaal schat het UNDP in dat het technisch potentieel van windenergie gelijk is aan 640 EJ/jaar.

De meest duidelijke negatieve effecten van windturbines betreft het gevaar voor vogels. Per jaar zou een windturbinepark van 1000 MW circa 20.000 vogels het leven kosten. Voor het eerder genoemde park van 45.000 MW gaat het dan bijna om 1 miljoen vogels per jaar. Dit is ongeveer gelijk aan 50% van het aantal vogels dat jaarlijks in het verkeer omkomt (PDE, 2002).

Zonne-energie (solar thermal electricity - STE)

Zonne-energie kan met zonneboilers worden omgezet in warmte dat vervolgens kan worden omgezet in elektriciteit. Volgens UNDP (2000) kan met een oppervlak gelijk aan 1% van het totale woestijnoppervlak in de wereld evenveel elektriciteit worden opgewerkt als jaarlijks mondiaal wordt gebruikt (circa 50 EJ). Hieruit kan worden geconcludeerd dat het technisch potentieel van STE ruim voldoende is om het mondiale fossiele energiegebruik te substitueren. Het mondiale fossiele energiegebruik in 2050 wordt door IIASA/WEC (1998) geschat op 400-800 EJ.

Zonne-energie (photovoltaic electricity – PVE)

Met behulp van zogenoemde foto-voltaische (PV) systemen kan zonne-energie ook rechtstreeks (dus niet via warmte) worden omgezet in elektriciteit. Volgens UNDP (2000) levert een PV-oppervlak van 3 tot 10 vierkante kilometer een 3,2 PJ aan elektriciteit per jaar. Hierbij is uitgegaan van een conversierendement (zonlicht naar elektriciteit) van 10%. Dit komt overeen met een opbrengst van 0,3 tot 1,1 GJ per vierkante meter PV-systeem. MilieuCentraal (2002) heeft berekend dat een PV-systeem van 1 m² jaarlijks 80 kWh (0,3 GJ) aan elektriciteit levert. Het rendement van PV-systemen zal vermoedelijk in de toekomst nog verder omhoog kunnen gaan (De Wit, 2002).

Het technisch potentieel van netgekoppelde foto-voltaische systemen op daken en gevels in Nederland bedraagt volgens ECN/RIVM op lange termijn 30 tot 110 GWp. Dit komt overeen met 10 tot 35 Mton CO₂, hetgeen 5 tot 20% van de totale Nederlandse CO₂-emissies in 2000 is. Het potentieel kan natuurlijk worden uitgebreid door ook in de niet-bebouwde omgeving zonnepanelen te plaatsen, bijvoorbeeld langs wegen.

Een Duitse studie (VES) schat dat op Europese schaal maximaal 7 EJ in de vorm van elektriciteit kan worden verkregen uit foto-voltaische systemen en zonnecollectoren. Dit komt ongeveer overeen met 20% van het Europese energiegebruik in 1990.

Het UNDP (2000) schat in dat op mondiale schaal het technisch potentieel van zonne-energie minimaal 1575 EJ bedraagt. Het betreft hier de energie-inhoud van de opgevangen zonnestrallen. Wordt dit middels een PV-systeem omgezet in elektriciteit dan resteert bij een conversierendement van 10% ongeveer 160 EJ. Volgens UNDP is deze 160 EJ echter een

ondergrens. De bovengrens (circa 5000 EJ aan elektriciteit) ligt een factor 5 tot 8 hoger dan het geschatte mondiale primaire energiegebruik in 2050 (IIASA/WEC, 1998).

Waterkracht

Het mondiale potentieel van waterkracht wordt in het algemeen laag ingeschat. Het UNDP (2000) schat in dat het potentieel van waterkracht ongeveer 50 EJ per jaar bedraagt.

Overig

Naast zon/wind/water zijn er nog andere hernieuwbare bronnen zoals geothermische energie en energie uit oceanen (getijde-energie, energie uit golven). Volgens UNDP (2000) is het technisch potentieel van geothermische energie zeer groot, ongeveer 5000 EJ hetgeen gelijk is aan ongeveer 9 maal het mondiale fossiele energiegebruik in 2050. Het probleem is echter, net als bij wind- en zonne-energie, dat de energiedichtheid (hoeveelheid op te wekken energie per hectare) relatief laag is zodat niet de beschikbaarheid van geothermische energie maar de prijs van de technologie om deze energie aan te wenden bepalend is voor het toekomstige aandeel van geothermische energie (UNDP, 2000). Het technisch potentieel van energie uit oceanen is niet bekend.

Kosten van energie uit zon/wind/water

Voor de prijs van elektriciteit of waterstof uit zon/wind/water op lange termijn wordt uitgegaan van een studie door UNDP (2000). Volgens UNDP bedraagt de huidige (1997) kostprijs van windenergie in Denemarken circa 0,04 USD/kWh. Volgens het projectbureau Duurzame Energie (PDE, 2002) bedraagt de kostprijs van windenergie op dit moment 0,05 tot 0,08 €/kWh, afhankelijk van de gemiddelde windsnelheid op de desbetreffende locatie. Volgens de Commissie Ampere (Ampere, 2000) bedragen de kosten voor elektriciteit uit wind tussen de 0,04 en 0,05 €/kWh. Ter vergelijking: de kostprijs van elektriciteit uit aardgas bedraagt tussen 0,03 en 0,04 €/kWh. UNDP (2000) verwacht dat de kostprijs van windenergie tussen 1997 en 2020 met 35 tot 45% daalt.

Volgens UNDP (2000) dalen de kosten van solar thermal electricity (STE) in de toekomst snel tot het niveau van elektriciteit uit windenergie (0,04 - 0,06 \$/kWh). Elektriciteit uit zonne-energie (PV-systemen) is op dit moment aanmerkelijk duurder dan elektriciteit uit windenergie. Volgens PDE (2002) liggen de kosten momenteel tussen de 0,70 €/kWh voor zogenoemde netgekoppelde PV-systemen en 2,75 €/kWh voor autonome PV-systemen. Volgens UNDP bedragen de huidige kosten voor PVE op dit moment 0,3 tot 1,5 USD/kWh en volgens Ampere (2000) liggen de huidige kosten voor elektriciteit uit PV-systemen tussen de 0,36 en 0,92 €/kWh. In de toekomst zullen kosten voor PVE nog fors kunnen dalen, Shell heeft de ambitie om de kostprijs met 5% per jaar te laten dalen. Volgens UNDP (2000) kunnen de kosten van PV in de toekomst dalen tot 0,05-0,06 USD/kWh.

Wanneer elektriciteit wordt omgezet in waterstof zijn de kosten aanzienlijk hoger, volgens Azar *et al.* (2001) kost waterstof uit zon/wind/water 18 USD/GJ. NOVEM (1999b) schat de kosten in op 16 USD/GJ.

BIJLAGE 5 VERBRANDINGSMOTOR-AANDRIJVING

Inleiding

Voor het inschatten van de potentie van de interne verbrandingsmotor (Internal Combustion Engine; ICE) in personenauto's op de lange termijn is gebruik gemaakt van het TNO-rapport 'Future emissions of passenger cars: expert judgement on the long term possibilities of conventional emission abatement technology' (Rijkeboer *et al.*, 2003). Voor dieselmotoren in zware wegvoertuigen (heavy duty vehicles) en dieselmotoren in de binnenvaart heeft de Adviesgroep Transport Emissies (ATE), onderdeel van TNO-WT in Delft, een inschatting gedaan van de technische mogelijkheden op lange termijn om de emissies en het brandstofverbruik te reduceren (Riemersma, 2002).

Personenauto's

Volgens TNO kunnen personenauto's met een benzinemotor op de lange termijn (na 2010) nog 85 tot 95% schoner worden dan de huidige Euro3-personenauto. Een personenauto met dieselmotor kan op de lange termijn 75 tot bijna 90% schoner worden.

Tabel 21 *Emissiefactoren nieuwe personenauto's, op dit moment (Euro3) en laagst mogelijk (EuroX)*

[g/km]	CO ₂	CO	VOS	NO _x	PM ₁₀
benzine ICE					
Euro3	200 – 240	5,24	0,32	0,054	0,005
EuroX	145 – 190	0,23 – 0,75	0,016 – 0,033	0,003 – 0,007	0,005
EuroX (t.o.v. Euro3)	-21% – -28%	-86% – -96%	-90% – -95%	-87% – -94%	0%
diesel ICE					
Euro3	160 – 185	0,12	0,02	0,72	0,050
EuroX	135 – 160	0,026 – 0,031	0,002 – 0,004	0,11 – 0,19	0,005 – 0,010
EuroX (t.o.v. Euro3)	-14% – -16%	-74% – -78%	-80% – -90%	-74% – -85%	-80% – -90%

bron: Rijkeboer *et al.* (2003)

Tabel 21 geeft de laagst mogelijke emissiefactoren voor personenauto's met een benzinemotor en een dieselmotor. Uit Tabel 21 wordt duidelijk dat zelfs op de lange termijn diesel-personenauto's aanzienlijk meer NO_x zullen emitteren dan benzine-personenauto's. De PM₁₀-emissies van benzine en dieselpersonenauto's kunnen op lange termijn ongeveer op hetzelfde niveau uitkomen. Hierbij moeten twee kanttekeningen worden geplaatst. De eerste is dat TNO zowel voor Euro3 als EuroX is uitgegaan van indirect-ingespoten benzinemotoren. Direct-ingespoten benzinemotoren, waarmee binnen enkele jaren vermoedelijk alle nieuwe personenauto's zullen zijn uitgerust, emitteren aanzienlijk meer PM₁₀. Dit zou betekenen dat ook EuroX-benzinemotoren meer PM₁₀ emitteren dan de 0,005 g/km in de bovenstaande tabel. Echter, TNO heeft voor EuroX-benzine-personenauto's verondersteld dat deze ook op lange termijn geen deeltjesfilter zullen hebben terwijl dit technisch wel mogelijk is. Wanneer wel een deeltjesfilter zou zijn verondersteld voor EuroX-

benzinepersonenauto's, zouden de PM₁₀-emissies aanzienlijk lager dan die van EuroX-dieselpersonenauto's zijn geweest.

Dieselpersonenauto's emitteren op lange termijn nog steeds 20 – 30% minder CO₂ en aanzienlijk minder CO en VOS dan benzinepersonenauto's.

De meerkosten voor EuroX-benzine-personenauto's ten opzichte van de huidige Euro3-benzine-personenauto zijn volgens Rijkeboer *et al.* (2003) gering omdat slechts sprake is van optimalisatie van bestaande systemen. De meerkosten voor EuroX-dieselpersonenauto's ten opzichte van Euro3-voertuigen bedragen enkele honderden Euro's omdat deeltjesfilters en/of NO_x-katalysatoren nodig zijn om de emissieniveaus zoals vermeld in Tabel 21 te kunnen realiseren.

Vrachtauto's, trekkers en autobussen

Volgens ATE kunnen de NO_x- en PM₁₀-emissies van zogenoemde heavy-duty dieselmotoren, zoals toegepast in vrachtauto's, trekker-opleggers en autobussen, nog eens 90% dalen ten opzichte van de emissieniveaus van nieuwe vrachtauto's die in 2008/2009 op de markt komen (Euro5). In de Verenigde Staten wordt in 2007 reeds een NO_x-emissienorm voor zware vrachtautomotoren ingevoerd van 0,27 g/kWh terwijl de Euro5-norm in de EU 2,0 g/kWh bedraagt.

ATE schat dat het brandstofverbruik van zware dieselmotoren niet zo heel veel meer zal kunnen dalen, met name wanneer de emissienormen voor NO_x nog verder zullen gaan worden aangescherpt na 2008/2009. Wel kunnen nog grote reducties in brandstofverbruik worden bereikt door verbeteringen aan voertuigen, zoals verlaging van luchtweerstand, rolweerstand, verlaging van massa van het voertuig, hybridisatie van de aandrijflijn, snelheidsverlaging, et cetera. ATE verwacht dat op lange termijn met dit pakket 40% brandstofverbruiksreductie ofwel 40% reductie in de CO₂-emissie per kilometer kan worden gerealiseerd.

Aangezien de emissieniveaus van heavy-duty dieselmotoren worden uitgedrukt als emissies per geleverde hoeveelheid energie aan de krukas (uitgaande as van de motor), zal een verlaging van de benodigde aandrijfenergie door technische verbeteringen aan het voertuig ook de emissies van vrachtauto's met nog eens 40% kunnen verlagen. Per saldo zouden de NO_x- en PM₁₀-emissies van zware dieselveertuigen op lange termijn met bijna 95% afnemen ten opzichte van Euro5.

In vergelijking tot de inschattingen die zijn gedaan voor personenauto's met een dieselmotor in de EuroX-studie, zijn de laagst haalbare emissieniveaus voor zware dieselmotoren een factor 5 lager voor NO_x en zelfs een factor 20 lager voor PM₁₀. De reden is volgens ATE dat de inschattingen voor zware dieselmotoren voor de lange termijn (~ 2050) zijn gedaan terwijl die voor lichte dieselmotoren gelden voor de middellange termijn (2020-2025). Hieruit kan worden geconcludeerd dat de inschattingen voor personenauto's voor de lange termijn

pessimistisch zijn en dat op lange termijn grotere emissiereducties kunnen worden bereikt dan die weergegeven in Tabel 21.

Binnenvaart

In de binnenvaart kunnen in principe dezelfde motoren worden ingezet als bij zware wegvoertuigen (zie hierboven). Dit betekent dat ook de emissieniveau's van motoren in de binnenvaart op lange termijn gelijk zouden kunnen zijn aan die in zware wegvoertuigen. Aangezien de CCR-fase 1-normen, die per 1-1-2002 van kracht zijn voor nieuwe binnenvaartmotoren, een factor 5 hoger ligt voor NO_x dan de Euro5-normen voor vrachtautomotoren, zullen de NO_x-emissies van nieuwe binnenvaart-motoren op lange termijn circa 98% lager kunnen zijn dan de NO_x-emissies van de huidige binnenvaartmotoren.

Toepassing van biobrandstoffen in verbrandingsmotoren

Methanol en ethanol kunnen tot een aandeel van 15 tot 20% worden gemixed met benzine zonder dat motoraanpassingen nodig zijn. Het gebruik van pure methanol/ethanol vergt mineure aanpassingen aan sommige motoren. De toepassing van methanol vergt aanpassingen aan motoren vanwege de corrosievorming en chemische aantasting door alcoholen. Door de lagere energiedichtheid van alcoholen moeten bij het gebruik van alcoholen de brandstoftanks voor dezelfde actieradius circa 50-75% groter zijn. Doordat methanol toxisch is, in tegenstelling tot ethanol, moeten bij het gebruik van methanol meer veiligheidsvoorzieningen worden getroffen (NOVEM, 1999a)(OECD/IEA, 1999).

Over de mate waarin biodiesel uit koolzaad (KME) kan worden gemengd met fossiele diesel bestaan verschillende meningen: volgens NOVEM (1999a) kan biodiesel slechts tot maximaal 20% worden gemengd terwijl OECD/IEA (1999) aangeeft dat biodiesel in elke verhouding kan worden gemengd met fossiele diesel. HTU(HydroThermal Upgrading)-diesel en FT(Fischer-Tropsch)-diesel kunnen onbeperkt met fossiele diesel worden vermengd (NOVEM, 1999a). Beide processen (HTU en FT) produceren uit biomassa dieselolie.

Tabel 22 en Tabel 23 geven de well-to-wheel emissies voor enkele geregelementeerde componenten bij toepassing van biobrandstoffen in verbrandingsmotoren van light-duty (LD)- en heavy-duty (HD)-voertuigen (OECD/IEA, 1999).

Tabel 22 Well-to-wheel emissies bij het gebruik van brandstoffen gemaakt uit biomassa in interne verbrandingsmotoren (Otto of Diesel) van light-duty voertuigen (LDV's)

		NO _x	CO	VOS	PM ₁₀
methanol uit cellulose	benzine = 100	119 – 142	71 – 102	76 – 117	n.d.
ethanol uit cellulose	benzine = 100	81 – 117	17 – 24	27 – 41	n.d.
ethanol uit suiker/zetmeel	benzine = 100	122 – 154	22 – 52	32 – 104	n.d.
biodiesel (KME)	diesel = 100	145 – 156	114 – 124	80 – 118	112 – 120
waterstof uit cellulose	benzine = 100	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

bron: OECD/IEA (1999)

Tabel 23 Well-to-wheel emissies bij het gebruik van brandstoffen gemaakt uit biomassa in interne verbrandingsmotoren (Diesel) van heavy-duty voertuigen (HDV's)

		NO _x	CO	VOS	PM ₁₀
methanol uit cellulose	diesel = 100	50 – 61	87 – 434	158 – 300	n.d.
ethanol uit cellulose	diesel = 100	94 – 103	577 – 1075	160 – 256	n.d.
ethanol uit suiker/zetmeel	diesel = 100	103 – 104	119 – 891	114 – 235	55
biodiesel (KME)	diesel = 100	118 – 127	81 – 212	68 – 120	90 - 98

bron: OECD/IEA (1999)

Tabel 22 geeft aan dat de toepassing van nagenoeg alle biobrandstoffen in verbrandingsmotoren well-to-wheel tot een lichte toename van NO_x-emissies leidt. De toepassing van bio-ethanol en biomethanol in benzinemotoren (eigenlijk Ottomotoren genoemd) leidt vermoedelijk tot een afname van CO- en VOS-emissies. De toepassing van biodiesel in dieselmotoren leidt tot een toename van alle emissies, wellicht met uitzondering van VOS-emissies. Ook Spirinckx en Ceuterick (1997) concluderen dat biodiesel uit koolzaadolie (KME) tot lichte toename van verzurende emissies (NO_x, NH₃ en SO₂) leidt in vergelijking tot fossiele diesel. Daarnaast neemt de fotochemische oxidantvorming, de eutrofiëring (vermesting) en de hoeveelheid afvalstoffen toe. Dit is met name aan de productie van koolzaad te wijten.

Tabel 23 geeft aan dat ethanol en methanol uit cellulose tot een afname van well-to-wheel NO_x-emissies leiden terwijl CO- en VOS-emissies fors kunnen toenemen (maximaal een factor 10). Het gebruik van biodiesel in heavy-duty dieselmotoren leidt tot een toename van NO_x-emissies en tot een afname van PM₁₀-emissies. De emissies van CO en VOS kunnen bij gebruik van biodiesel toe- of afnemen.

Het voorgaande handelt over de emissies van verbrandingsmotoren wanneer deze biobrandstoffen gebruiken in vergelijking tot het gebruik van fossiele brandstoffen. Dit zegt echter nog niets over de minimaal haalbare emissieniveau's bij het gebruik van biobrandstoffen in verbrandingsmotoren. Uit Tabel 21 blijkt dat verbrandingsmotoren gebruik makend van benzine of diesel aanzienlijk schoner kunnen zijn dan nu het geval is. Deze emissiereducties zijn waarschijnlijk ook te behalen bij het gebruik van biobrandstoffen. Hiermee kan worden geconcludeerd dat wanneer biobrandstoffen worden gebruikt in verbrandingsmotoren de niet-CO₂-emissies door de sector verkeer en vervoer op lange termijn 90-95% lager kunnen zijn dan in 1990.

Discussie en conclusie

Per saldo kan worden geconcludeerd dat de gereguleerde emissies (CO, VOS, NO_x en PM₁₀) uit benzine- (of eigenlijk Otto-) als dieselmotoren op lange termijn met meer dan 90% kunnen worden gereduceerd ten opzichte van 1990. Dit geldt zowel bij het gebruik van fossiele brandstoffen als van biobrandstoffen. Het brandstofverbruik per kilometer van personenauto's kan op lange termijn met 15 – 40% worden gereduceerd, voor vrachtauto's is ingeschat dat de maximale verbruiksreductie circa 40% bedraagt. Dit is, uitgaande van het gebruik van fossiele brandstoffen, niet voldoende om de CO₂-emissies in het wegverkeer op lange termijn met 80% te reduceren ten opzichte van 1990. Volgens de IPCC is een 80% reductie van de broeikasgasemissies ten opzichte van 1990 noodzakelijk om de opwarming van de aarde op termijn een halt toe te roepen.

BIJLAGE 6 BRANDSTOFCEL-ELEKTRISCHE AANDRIJVING

Inleiding

Brandstofcellen zijn er in drie soorten:

- PEM (polymeer membrane)-brandstofcellen; zetten waterstof om in elektriciteit;
- DM (direct methanol)-brandstofcellen; zetten methanol direct om in elektriciteit;
- SO (solid oxide)-brandstofcellen; zet methaan direct om in elektriciteit.

In een PEM-brandstofcel worden waterstof en zuurstof, zonder te worden verbrand, omgezet in water(damp) waarbij tevens elektriciteit vrijkomt. Met de elektriciteit kan een elektromotor worden gevoed. De ontwikkeling van de DM loopt achter bij die van de PEM vanwege problemen met lekkage van methanol en de levensduur. Waterstof kan aan boord van voertuigen worden opgeslagen of aan boord worden geproduceerd uit methanol en benzine door middel van een reformer. De efficiency van de omzetting van benzine en methanol in waterstof bedraagt circa 70 tot 80%. De SOFC, die nog in laboratoriumfase verkeert, komt alleen in aanmerking voor grotere vervoermiddelen vanwege de hoge werktemperaturen, laag specifiek vermogen (per gewicht of volume) en lange opstarttijd. Middels een eenvoudige reformer kan diesel omgezet worden in aardgas (methaan) dat direct als input van de SOFC dient. Het omzettingsrendement (verhouding tussen energie in de opgewekte elektriciteit ten opzichte van de energie in de brandstof) van de SOFC ligt op 70%, dat van de PEMFC en DMFC op circa 45% (Troelstra, 1999).

CO₂-emissiereductie

Weiss *et al.* (2000) rapporteert de well-to-wheel CO₂-emissies door personenauto's met verschillende soorten brandstofcellen, gebruik makend van benzine, methanol en waterstof. Weiss *et al.* (2000) veronderstellen dat zowel methanol als waterstof worden geproduceerd uit aardgas, hetgeen zonder CO₂-opslag niet duurzaam genoemd mag worden. Tabel 24 geeft de well-to-wheel CO₂-emissies ten opzichte van de toekomstige (2020) personenauto met een verbrandingsmotor. De bandbreedte representeert de onzekerheden in de resultaten van Weiss *et al.* (2000).

Tabel 24 *Well-to-wheel CO₂-emissies van personenauto's met brandstofcel (index: ICEV-benzine in 2020 = 100)*

brandstof:	ondergrens	middenschatting	bovengrens
ICEV-benzine (optimaal)	80	88	95
FCEV-benzine	75	100	135
FCEV-methanol	55	80	105
FCEV-waterstof	50	75	100

bron: Weiss *et al.* (2000)

Uit Tabel 24 blijkt dat de brandstofcel op (uit aardgas geproduceerde) methanol of waterstof tot de grootste vermindering van CO₂-emissies kan leiden. De maximale reductie bedraagt circa 50%. In het geval van een brandstofcel met een reformer die uit benzine waterstof

produceert, kunnen de well-to-wheel CO₂-emissies ook hoger zijn dan in het geval van het gebruik van fossiele benzine in een verbrandingsmotor.

Wanneer in plaats van aardgas biomassa wordt gebruikt voor de productie van methanol en waterstof zijn de well-to-wheel CO₂-emissies van FC-methanol en FC-waterstof aanzienlijk lager dan in Tabel 24. Volgens NOVEM (1999b) kan een brandstofcel op bio-methanol een well-to-wheel CO₂-reductie van 94% bereiken ten opzichte van verbrandingsmotoren op benzine.

Overige emissies

De CO- en PM₁₀-emissies van brandstofcellen zijn nagenoeg verwaarloosbaar. TNO-WT (Rijkeboer *et al.*, 2003) schat in dat de gereguleerde emissies door een personenauto met brandstofcel nagenoeg 100% lager zijn. Wel vinden er tijdens de productie van de brandstoffen niet-CO₂-emissies plaats. Deze zijn echter zeer gering ten opzichte van de emissies ten gevolge van het gebruik van benzine of diesel in verbrandingsmotoren.

Kosten

Ogden *et al.* (1999) onderscheidt drie kansrijke opties voor de brandstofcel, te weten:

- waterstof: gasvormige opslag aan boord
- methanol: omvorming tot waterstof aan boord middels ‘steam reforming’
- benzine: omvorming tot waterstof aan boord middels ‘partial oxidation’

In een vergelijking van implicaties van voertuigontwerp en brandstofinfrastructuur komen Ogden *et al.* (1999) tot de volgende conclusies:

- waterstof-brandstofcelvoertuigen zijn energie-efficiënter en kosten bovendien minder dan de andere twee opties;
- het ontwikkelen van een brandstofinfrastructuur voor waterstof kost echter een factor 6 tot 12 meer dan dat voor methanol of benzine;
- per saldo (voertuig + brandstofinfrastructuur) zijn de kosten per voertuig voor alle drie opties ongeveer gelijk;
- Ogden *et al.* preferen de waterstof-brandstofcel omdat deze het meest energie-efficiënt is, het minst kost en de mogelijkheid biedt om lage CO₂ well-to-wheel emissies en te bereiken en lokale milieuverontreinigende emissies te elimineren.

Volgens Weiss *et al.* (2000) is de prijs van een brandstofcelauto in 2020 gemiddeld 25 tot 30% hoger dan van een conventionele benzineauto in 2020. De kosten per kilometer van een brandstofcelauto zijn volgens Weiss *et al.* (2000) circa 15 tot 20% hoger. Weiss *et al.* gaan hierbij uit van waterstofproductie uit aardgas. Volgens Troelstra (1999) is een personenauto met een brandstofcel 15 tot 35% duurder dan een conventionele benzineauto in geval sprake zal zijn van massaproductie van brandstofcelauto's. De optie waarbij aan boord benzine wordt getransformeerd in waterstof is de duurste optie, de opslag van waterstof aan boord de goedkoopste. Dit is analoog aan de conclusie van Ogden *et al.* (1999).

In de GAVE-studie (NOVEM, 1999b) worden aanzienlijk hogere kosten geraamd voor energieketens waarbij brandstofcellen in voertuigen zijn betrokken. Dit wordt voornamelijk verklaard doordat in de GAVE-studie is verondersteld dat brandstofcellen eens in de 5 jaar en accupakketten eens in de 4 of 5 jaar moeten worden vervangen. Wanneer zou worden verondersteld dat brandstofcellen en accupakketten op lange termijn een levensduur hebben gelijk aan die van het voertuig, dalen de meerkosten per voertuigkilometer van brandstofcelvoertuigen tot 10-40% meer dan die van conventionele voertuigen met verbrandingsmotoren.

Toepassing binnen verkeer en vervoer

In principe kunnen brandstofcellen in alle gelederen van de sector verkeer en vervoer worden toegepast. Toepassing in sectoren met lage brandstofkosten, zoals bijvoorbeeld de binnenvaart en zeescheepvaart, ligt niet voor de hand (Troelstra, 1999). Bovendien geldt dat het ketenrendement van de huidige brandstofketen (dieselolie/stookolie gecombineerd met twee- of viertakt dieselmotoren) dermate hoog is dat brandstofcellen dit vermoedelijk niet of nauwelijks kunnen overtreffen.

Dings *et al.* (2000) hebben onderzoek gedaan naar het milieu-effect van vliegtuigen met brandstofcellen en elektrisch aangedreven propellermotoren. In vergelijking tot vliegtuigen met hetzelfde aantal zitplaatsen met conventionele straalmotoren is het energiegebruik (aan boord) van dergelijke brandstofcelvliegtuigen 50 tot 65% lager. In hoeverre het well-to-wheel energiegebruik en de CO₂-emissies door dergelijke vliegtuigen lager zijn hangt af van de wijze waarop de waterstof geproduceerd is. Verder is nog onduidelijk in hoeverre het afwezig zijn van NO_x-emissies wordt gecompenseerd door de verhoogde emissie van waterdamp.

Belemmeringen

Onderzoek door Borgwardt (2001) leert dat de beperkte beschikbaarheid van platina dat wordt gebruikt in brandstofcellen een beperking zal kunnen vormen voor de snelheid van de transitie naar brandstofcellen. Borgwardt schat voor de USA in dat de volledige transitie van verbrandingsmotoren naar brandstofcellen in Amerikaanse wegvoertuigen onder de meest gunstige omstandigheden minimaal circa 65 jaar in beslag zal nemen. De vraag naar platina door alleen al de Amerikaanse auto-industrie bedraagt dan circa 50% van de mondiale productie. In dat geval zal de prijs van platina oplopen evenals de kostprijs van brandstofcellen.

BIJLAGE 7 BATTERIJ-ELEKTRISCHE AANDRIJVING

Potentieel

Het toekomstig potentieel van elektrische voertuigen op duurzame elektriciteit wordt niet zozeer bepaald door de beschikbaarheid van duurzame elektriciteit (zie Bijlage 4) maar door de bereidheid van consumenten om elektrische auto's aan te schaffen. Tot op heden is het aandeel van reeds beschikbare elektrische auto's zeer gering hetgeen wordt bepaald door een beperkte actieradius ten opzichte van auto's met verbrandingsmotoren, de relatieve hoge aanschafkosten en waarschijnlijk door het hardnekkige imagoprobleem van elektrische auto's. De actieradius van elektrische auto's met loodzuuraccu's ligt op dit moment op circa 100-150 kilometer. Volgens TNO-INRO (2001) legt circa 45% van de automobilisten minder dan 125 kilometer per dag af en de actieradius zou voor deze groep automobilisten dus in principe geen belemmering hoeven zijn om een elektrische auto aan te schaffen. TNO-INRO (2001) schat in dat de marktkansen voor een compacte elektrische auto in 2015 maximaal 15% kunnen bedragen, waarbij wordt opgemerkt dat dit aandeel alleen haalbaar is als aanbieders van elektrische auto's moeite zullen doen om deze auto's te verkopen. Janse *et al.* (1997) schatten in dat de mogelijke penetratie van elektrische auto's voor in het stadsverkeer circa 0,5 mln voertuigen bedraagt, hetgeen overeenkomt met een aandeel van circa 5 tot 10% van het personenautopark. Van den Bosch *et al.* (2000) hanteren voor het marktpotentieel van elektrische auto's in Nederland in 2015 een bandbreedte van 7 tot 18%.

Volgens Van Binsbergen *et al.* (1994) kan de actieradius met een ZnO₂-accu (zink-lucht), die wanneer deze leeg is moet worden vervangen door een volle accu, oplopen tot circa 400 km⁸. Een dergelijke batterij weegt volgens Van Binsbergen *et al.* (1994) echter wel 40 tot 150% van het gewicht van een personenauto, hetgeen het energiegebruik verhoogt. Bovendien zal het vervoeren van lege accu's naar een centraal oplaadstation gepaard gaan met extra energiegebruik. Bij het gebruik van verwisselbare accu's vormt de beperkte actieradius van elektrische auto's in theorie voor bijna geen enkele automobilist een echte belemmering. Een andere optie is de toepassing van externe voeding ('bovenleiding'). Daarbij moet rekening worden gehouden met hoge kosten voor aanleg van deze infrastructuur en energieverliezen ten gevolge van de distributie van elektriciteit. In hoeverre het imago van elektrische auto's een belemmering zal blijven vormen voor de verdere opmars van elektrische auto's is moeilijk te voorspellen.

CO₂-emissiereductie

De wijze van opwekking van elektriciteit bepaalt in belangrijke mate in hoeverre het gebruik van elektrische auto's de well-to-wheel CO₂-emissie kan verlagen. Bij opwekking van elektriciteit met kolen zal de vermindering van de CO₂-emissie slechts 10% bedragen, bij

⁸ Ter vergelijking: de actieradius van een auto met een conventionele verbrandingsmotor bedraagt 750 tot 1000 km.

opwekking met aardgas 50% en bij opwekking met duurzame bronnen (zon/wind/geothermisch) zelfs 90% (Elzen *et al.*, 1996).

Volgens Weiss *et al.* (2000) ligt de well-to-wheel CO₂-emissie van elektrische auto's in 2020 circa 10 tot 50% lager (gemiddeld 30% lager) dan van een conventionele benzineauto in 2020. Hierbij is door Weiss *et al.* uitgegaan van een elektriciteitscentralepark bestaande uit 52% kolen, 28% aardgas, 10% nucleair en circa 10% duurzaam.

In de GAVE-studie (NOVEM, 1999b) is berekend dat elektrische personenauto's well-to-wheel circa 40% minder CO₂ emitteren in vergelijking tot personenauto's met een verbrandingsmotor wanneer het huidige elektriciteitspark wordt beschouwd. Wanneer elektriciteit uit hernieuwbare bronnen wordt geproduceerd is de CO₂-emissie nagenoeg nul.

Kosten

De kosten per kilometer voor eigenaars van elektrische personenauto's in 2020 zijn 10% lager tot 80% hoger (gemiddeld 30% hoger) dan voor vergelijkbare conventionele benzineauto's (Weiss *et al.*, 2000). De grote bandbreedte wordt vermoedelijk verklaard door veronderstellingen over de frequentie waarmee de batterijen moeten worden vervangen. De kosten van batterijen hebben volgens NOVEM (1999b) namelijk een aandeel van circa 75% in de kosten van de elektrische aandrijflijn en daarmee een aandeel van circa 35% in de kosten van een elektrische personenauto. NOVEM (1999b) schat in dat een elektrische aandrijflijn per kW motorvermogen ruim 2 maal zo duur is als een verbrandingsmotor. Uitgaande van de kosten van een personenauto exclusief aandrijflijn van circa € 14.000 en de prijs van een verbrandingsmotor van circa € 5500 kan worden afgeleid dat de productiekosten van elektrische personenauto's circa 35% hoger zijn dan van personenauto's met een verbrandingsmotor. De gebruikerskosten zijn volgens NOVEM (1999b) echter aanzienlijk hoger omdat de batterijen van elektrische voertuigen iedere vier jaar moeten worden vervangen.

Toepassing binnen verkeer en vervoer

Batterij-elektrische aandrijving kan in theorie in alle gelederen van de sector verkeer en vervoer worden toegepast. Door de nog steeds beperkte energiec capaciteit (per kg en per m³) van accu's zal deze technologie vermoedelijk alleen kans maken bij vervoermiddelen die per dag geringe afstanden afleggen. Te denken is aan stadsdistributievoertuigen en wellicht de tweede of derde auto. Het gebruik van accu's die niet aan boord worden opgeladen maar kunnen worden verwisseld, vergroot de potentie van de batterij-elektrische technologie.