



Energy research Centre of the Netherlands

Duurzame innovatie in het wegverkeer

**Een evaluatie van vier transitiepaden voor het
thema Duurzame Mobiliteit**

C.B. Hanschke

M.A. Uyterlinde

P. Kroon

H. Jeeninga

H.M. Londo

ECN-E--08-076

Januari 2009

Verantwoording

Het project staat bij ECN geregistreerd onder nummer 7.7962. De auteurs bedanken de leden van de begeleidingscommissie vanuit de Ministeries van Verkeer & Waterstaat en VROM voor hun constructieve bijdragen. De auteurs bedanken Gerben Passier en Ruud Verbeek (TNO) voor het reviewen van de kwantitatieve analyse inclusief de (veelal) technische uitgangspunten. De bevindingen, inclusief een reactie hierop van ECN, zijn opgenomen in de bijlage. De auteurs bedanken verder Anco Hoen (PBL) voor het reviewen van de samenvatting en conclusies. Uiteraard is de inhoud volledig de verantwoordelijkheid van de auteurs.

Abstract

The Dutch government has set ambitious targets for greenhouse gas emission reduction by 2020. Therefore, it aims at accelerating the market penetration of innovative technologies for sustainable mobility. Three innovation-scenarios have been developed for the Dutch road transport sector until 2040 with penetration of a number of technical innovations in drive trains and alternative fuels. The options considered are (plug-in) hybrids, low-rolling resistance tyres, intelligent transport systems, biofuels, CNG, all-electric and hydrogen. This report presents results of a detailed assessment of the emission reductions and costs for four specific 'transition paths' within these scenarios: intelligent transport systems, biofuels, 'hybrid, plug-in hybrid and all-electric' and hydrogen. Furthermore, the report provides a framework and suggestions for the Dutch government on how to effectively and efficiently support these innovative technologies, within an international context. The report concludes that technical innovations in drive trains and alternative fuels can achieve substantial CO₂ emission reductions in the Dutch road transport sector via biofuels and intelligent transport systems (short term) and zero emission vehicles (long term: electricity or hydrogen). The different technologies all have different challenges, requiring customised policy options that should be in line with the stage of the innovation (R&D, demonstration, early market or commercialization). Furthermore, as the large scale market penetration of new vehicle types takes several decades, early action is necessary. Combined with the large costs involved, a long-term strategy with clear priorities is needed. This strategy should incorporate the following aspects: CO₂ emission reduction, energy savings, air quality and reduction of the dependency on imported oil.

Inhoud

| | |
|--|----|
| Lijst van tabellen | 5 |
| Lijst van figuren | 6 |
| Samenvatting | 7 |
| 1. Inleiding | 19 |
| 2. Aanpak | 21 |
| 2.1 Uitgangspunten | 21 |
| 2.2 Van innovatiescenario naar individuele transitiepaden | 22 |
| 2.3 Discussie van onzekerheden | 22 |
| 3. Innovatiescenario's | 24 |
| 3.1 Overzicht scenario's | 24 |
| 3.2 Emissiereductie potentieel & kosteneffectiviteit | 27 |
| 4. Transitiepad biobrandstoffen | 36 |
| 4.1 Ontwikkelingsperspectief | 36 |
| 4.2 Emissiereductie & kosteneffectiviteit | 39 |
| 4.3 Implicaties voor beleid | 40 |
| 5. Transitiepad waterstof | 43 |
| 5.1 Ontwikkelingsperspectief | 43 |
| 5.2 Emissiereductie & kosteneffectiviteit | 44 |
| 5.3 Implicaties voor beleid | 46 |
| 6. Transitiepad hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer | 50 |
| 6.1 Ontwikkelingsperspectief | 50 |
| 6.2 Emissiereductie & kosteneffectiviteit | 53 |
| 6.3 Implicaties voor beleid | 56 |
| 7. Transitiepad energiebesparende ICT | 60 |
| 7.1 Ontwikkelingsperspectief | 60 |
| 7.2 Emissiereductie & kosteneffectiviteit | 61 |
| 7.3 Implicaties voor beleid | 62 |
| 8. Rijden op aardgas in transitieperspectief | 64 |
| 8.1 Inleiding | 64 |
| 8.2 Huidige stimulering | 65 |
| 8.3 Aardgas als voorloper voor groen gas | 65 |
| 8.4 Aardgas als voorloper voor waterstof in brandstofcelvoertuigen | 67 |
| 8.5 Zijn er kostendalingen te verwachten? | 68 |
| 8.6 Conclusies | 68 |
| 9. Beleidsanalyse | 71 |
| 9.1 Aandachtspunten voor innovatiebeleid | 71 |
| 9.2 Instrumentatie transitiepaden | 73 |
| 9.3 Internationaal perspectief | 74 |
| 9.4 Wat kan Nederland doen? | 75 |
| 10. Conclusies en aanbevelingen | 77 |
| 10.1 Conclusies | 77 |
| 10.2 Beleidsaanbevelingen | 80 |
| 10.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek | 80 |
| Afkortingenlijst | 82 |
| Referenties | 83 |
| Internetbronnen | 86 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Bijlage A | Overzicht scenario's: Marktaandelen innovaties | 87 |
| Bijlage B | Achterliggende gegevens | 89 |
| | B.1 Technische gegevens | 89 |
| | B.2 Kostenmethodiek | 92 |
| | B.3 Brandstofprijzen | 93 |
| | B.4 Basisprijzen referentievoertuigen | 96 |
| | B.5 Meerkosten voertuigen | 96 |
| Bijlage C | Innovatiescenario's: IPCC-reductiepotentieel | 99 |
| Bijlage D | TNO Review | 100 |
| Bijlage E | ECN-reactie op TNO review | 105 |

Lijst van tabellen

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabel S.1 | <i>CO₂-ketenemissie reductiepotentieel van de vier transitiepaden (NL-methode)</i> | 10 |
| Tabel S.2 | <i>Kosteneffectiviteit voor CO₂-ketenemissies van de vier transitiepaden (NL-methode)</i> | 13 |
| Tabel S.3 | <i>Belangrijkste uitdagingen per transitiepad</i> | 15 |
| Tabel S.4 | <i>Instrumentatie korte termijn per transitiepad en aangrijpingspunt</i> | 16 |
| Tabel 2.1 | <i>Directe en ketenemissiefactoren van brandstoffen</i> | 21 |
| Tabel 2.2 | <i>Overzicht koppeling innovatiescenario's en individuele transitiepaden</i> | 22 |
| Tabel 3.1 | <i>Brandstofkosten personenwagens per 100 km en de relatieve verkeersprestatie</i> | 33 |
| Tabel 3.2 | <i>Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies</i> | 34 |
| Tabel 3.3 | <i>Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - impact extra hoge fossiele brandstofprijzen</i> | 35 |
| Tabel 4.1 | <i>Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - biobrandstoffen</i> | 40 |
| Tabel 5.1 | <i>Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse emissiefactoren waterstof</i> | 45 |
| Tabel 5.2 | <i>Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - waterstof</i> | 45 |
| Tabel 6.1 | <i>Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse ketenemissiefactoren elektriciteit</i> | 55 |
| Tabel 6.2 | <i>Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - Elektrisch vervoer en plug-in hybride</i> | 56 |
| Tabel 7.1 | <i>Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - Energiebesparende ICT</i> | 62 |
| Tabel 8.1 | <i>Prijs en prijsopbouw CNG en diesel</i> | 65 |
| Tabel 9.1 | <i>Belangrijkste uitdagingen per transitiepad</i> | 73 |
| Tabel 9.2 | <i>Instrumentatie korte termijn per transitiepad en aangrijpingspunt</i> | 74 |
| Tabel A.1 | <i>Marktaandeelen innovaties in verkeerspresentatie per scenario</i> | 87 |
| Tabel B.1 | <i>Energieverbruik per kilometer per voertuigtype-brandstofcombinatie</i> | 91 |
| Tabel B.2 | <i>Besparingseffect innovatieve technologieën op energieverbruik per voertuigtype</i> | 92 |
| Tabel B.3 | <i>Basisprijzen energiedragers</i> | 93 |
| Tabel B.4 | <i>Gehanteerde brandstofprijzen exclusief heffingen en BTW</i> | 94 |
| Tabel B.5 | <i>Extra hoge brandstofprijzen voor gevoeligheidsanalyse exclusief heffingen en BTW</i> | 95 |
| Tabel B.6 | <i>Basisprijzen van de voertuigen</i> | 96 |
| Tabel B.7 | <i>Meerkosten innovatieve technologieën per voertuigtype voor innovatiescenario's</i> | 97 |
| Tabel B.8 | <i>Meerkosten elektrisch voertuig bij personen en bestelauto's</i> | 98 |

Lijst van figuren

| | | |
|-------------|--|----|
| Figuur S.1 | <i>CO₂-ketenemissie wegverkeer (NL methode)</i> | 9 |
| Figuur 3.1 | <i>Ontwikkeling wagenpark: personenauto's</i> | 26 |
| Figuur 3.2 | <i>Ontwikkeling wagenpark: bestelwagens</i> | 26 |
| Figuur 3.3 | <i>Ontwikkeling wagenpark: Autobussen (inclusief touringcars)</i> | 27 |
| Figuur 3.4 | <i>CO₂-ketenemissie wegverkeer (NL methode)</i> | 27 |
| Figuur 3.5 | <i>Absoluut en relatief reductiepotentieel CO₂-ketenemissies per voertuigtype</i> | 29 |
| Figuur 3.6 | <i>Reductiepotentieel CO₂-ketenemissies wegverkeer per optie (NL methode)</i> | 30 |
| Figuur 3.7 | <i>Directe overige emissies wegverkeer: NO_x (links) en PM₁₀ (rechts)</i> | 31 |
| Figuur 3.8 | <i>CO₂-ketenemissies met en zonder verdieseling ten opzichte van referentiescenario</i> | 32 |
| Figuur 3.9 | <i>Jaarlijkse brandstofkosten wegverkeer</i> | 33 |
| Figuur 3.10 | <i>Jaarlijkse kosten wagenpark</i> | 34 |
| Figuur 4.1 | <i>Energiegebruik: aandeel biobrandstoffen en benzine/diesel</i> | 37 |
| Figuur 4.2 | <i>CO₂-ketenemissiereductie potentieel biobrandstoffen</i> | 39 |
| Figuur 5.1 | <i>Aandeel waterstof brandstofcelauto's</i> | 44 |
| Figuur 5.2 | <i>CO₂-ketenemissiereductie potentieel waterstof</i> | 44 |
| Figuur 5.3 | <i>CO₂-ketenemissie wegverkeer: gevoeligheidsanalyse emissiefactor waterstof</i> | 45 |
| Figuur 6.1 | <i>Aandeel plug-in hybride</i> | 52 |
| Figuur 6.2 | <i>Aandeel elektrisch vervoer (all-electric)</i> | 53 |
| Figuur 6.3 | <i>CO₂-ketenemissiereductie potentieel hybride en plug-in hybride</i> | 53 |
| Figuur 6.4 | <i>CO₂-ketenemissiereductie potentieel elektrisch vervoer en plug-in hybride</i> | 54 |
| Figuur 6.5 | <i>CO₂-ketenemissie wegverkeer: gevoeligheidsanalyse emissiefactor elektriciteit</i> | 55 |
| Figuur 6.6 | <i>Vergelijking CO₂ ketenemissie per gereden km voor waterstof en elektriciteit</i> | 56 |
| Figuur 7.1 | <i>Aandeel energiebesparende ICT in nieuwverkopen</i> | 61 |
| Figuur 7.2 | <i>CO₂-ketenemissiereductie potentieel energiebesparende ICT</i> | 61 |
| Figuur 8.1 | <i>Well-to-wheel CO₂-emissiereductie in Scenario 1</i> | 67 |
| Figuur 9.1 | <i>Huidige positie van de transitiepaden in de innovatie cyclus</i> | 71 |
| Figuur 9.2 | <i>Aangrijpingspunten fiscale stimulering</i> | 72 |
| Figuur B.1 | <i>Gehanteerde brandstofprijzen exclusief heffingen en BTW</i> | 95 |
| Figuur C.1 | <i>Directe CO₂-emissiewegverkeer (IPCC-methode)</i> | 99 |

Samenvatting

De overheid hanteert een viertal transitiepaden voor het thema Duurzame Mobiliteit. Deze paden geven richting aan de ambities die geformuleerd zijn in de programma's Schoon en Zuinig en 'De auto van de toekomst gaat rijden'. De vier transitiepaden zijn:

- Hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer.
- Toepassing van biobrandstoffen.
- Rijden op waterstof.
- Intelligente Transport Systemen: massa-individualisering van automobilititeit.

In deze studie is voor deze vier transitiepaden, en drie achterliggende innovatiescenario's een inschatting gemaakt van de bijdrage aan klimaatdoelen en de kosteneffectiviteit. Vervolgens is voor ieder transitiepad in kaart gebracht wat de implicaties voor beleid zijn en zijn er suggesties voor beleidsinstrumenten gedaan. Er is voortgebouwd op de innovatiescenario's uit een voorgaande studie (Uyterlinde et al., 2008). Deze scenario's zijn uitgebreid met het lange termijn perspectief (2040) en er is een derde innovatiescenario met een groot marktaandeel elektrisch vervoer ontwikkeld. De nadruk ligt op de bijdrage van technische innovaties in voertuigaandrijving en brandstoffen aan energiebesparing en CO₂-emissiereductie in het wegverkeer.

S.1. Hoofdboodschap: Duurzame innovatie in het wegverkeer

Het halen van lange termijn doelen in de transportsector is alleen mogelijk via (vrijwel) nul-emissie technologie, zoals energiebesparing, duurzame waterstof en elektriciteit, en duurzame (tweede generatie) biobrandstoffen. Ontwikkeling van deze lange termijn optie(s) moet plaats vinden voordat de grenzen van het verder optimaliseren van de interne verbrandingsmotor in zicht komen.

Een aantal technologieën, zoals hybride voertuigen, eerste generatie biobrandstoffen, in-car ITS, en CNG (als voorloper van groen gas), is al voldoende ver ontwikkeld voor grootschalige marktintroductie. Helaas bieden die technologieën op de wat langere termijn onvoldoende perspectief. Bovendien is er bij eerste generatie biobrandstoffen, behalve van een beperkt potentieel, ook sprake van mogelijk sterke ongewenste neveneffecten.

De meeste opties met een groot lange termijn potentieel zijn nu nog in demonstratiefase en vergen systeeminnovaties, met gecoördineerd beleid op meerdere fronten. Vanwege de schaal-grootte is Europees beleid cruciaal, en het is nog niet duidelijk welke technologie de winnaar zal blijken te zijn. Nederland kan binnen de koers die Europa vaart, strategische keuzes maken die de nationale belangen het beste dienen. Er is ook een aantal niches, zoals innovatieve bussen en ICT waar Nederland een voortrekkersrol kan spelen.

Om innovaties in de markt te zetten is financiële steun nodig gedurende een lange periode. Vergeleken met CO₂-reductiemaatregelen in andere sectoren zijn de kosten relatief hoog. Bovendien blijkt de aard en timing van de transitiepaden zo verschillend te zijn, dat generiek (bron) beleid niet zal voldoen.

S.2. Innovatiescenario's: Wat kan er met innovatie bereikt worden?

Drie innovatiescenario's voor drie verschillende toekomstbeelden

Om de impact van innovatie in het wegverkeer te bepalen is een referentiescenario ontwikkeld. Dit referentiescenario heeft als achtergrondbeeld de hoge prijs variant van het WLO-GE scenario (WLO-GE HP) en komt verder overeen met de lage variant in de beoordeling van het beleidspakket Schoon en Zuinig voor het wegverkeer. Dit referentiescenario is als basis gebruikt

voor drie verschillende toekomstbeelden voor het wegverkeer waarin innovatieve aandrijvingen en brandstoffen een grote rol spelen.

In Scenario 1 *Generieke innovatie* blijft de interne verbrandingsmotor dominant. Emissiereductie wordt vooral bereikt via energiebesparende innovaties (hybrides, banden met lage rolweerstand en energiebesparende ICT), alsmede biobrandstoffen, CNG en (schone) fossiele brandstoffen. Na 2030 stabiliseert het emissieniveau doordat de energiebesparende technologieën al bijna volledig gepenetreerd zijn, en de hoeveelheid ingezette (duurzame) biobrandstoffen stabiliseert. Als na 2030 nog verdergaande emissiereducties gewenst zijn, zullen andere innovaties zoals waterstof en elektriciteit, overwogen moeten worden.

In Scenario 2 *Technologie specifieke innovatie - waterstof* vindt een doorbraak van waterstof en brandstofcellen plaats. Door de sterkere coördinatie van het Europese en Nederlandse beleid, groeit ook het marktaandeel van een aantal energiebesparende toepassingen, zoals banden met lagere rolweerstand en energiebesparende ICT, sneller. De hoeveelheid biobrandstoffen is lager dan in Scenario 1 doordat een deel van de beschikbare biomassa ingezet wordt voor de duurzame productie van waterstof. Door de diverse mogelijke productieroutes van waterstof is dit scenario minder afhankelijk van een specifieke (fossiele) brandstof.

Scenario 3 *Technologie specifieke innovatie - elektriciteit* is vergelijkbaar met Scenario 2, alleen is elektrisch vervoer hier meer succesvol. De doorbraak van elektrisch vervoer (all-electric) wordt voorafgegaan door een sterke hybridisering, met een steeds groter aandeel plug-in hybrides. Door verdere (accu)technologische verbeteringen, positieve ervaringen met (deels) elektrisch rijden en lagere kosten, breekt uiteindelijk het all-electric voertuig door. Voor bepaalde segmenten zal de plug-in hybride echter interessant blijven. Aangezien elektriciteit uit diverse bronnen geproduceerd kan worden, is ook dit scenario minder afhankelijk van een specifieke energiedrager.

Substantiële emissiereductie mogelijk door innovatie

Als Nederland en Europa sterk inzetten op innovatie, zodat de technologieën conform één van de innovatiescenario's de Nederlandse markt penetreren, is een substantiële reductie in de 'well to wheel' emissies van CO₂, ofwel ketenemissies, mogelijk. In 2020 kunnen de ketenemissies van het wegverkeer dalen met ongeveer 6 Mton ten opzichte van 2005, zie Figuur S.1. Rond 2030 wordt het niveau van 1990 gehaald. Na 2030 zullen de absolute ketenemissies, ondanks de gestegen vervoersbehoefte, nog licht dalen, waarbij, bij de gebruikte uitgangspunten, een transitie naar waterstof nog een grotere reductie kan opleveren.

Indien niet naar ketenemissies, maar naar directe emissies conform de IPCC-methode¹ gekeken wordt, is de reductie vergelijkbaar. Als een deel van de teelt en productie van biobrandstoffen in Nederland plaatsvindt, staat hier een stijging van emissies in andere sectoren tegenover.

Voor de overige emissies, NO_x en PM₁₀, levert innovatie ook reducties op, maar erg beperkt in vergelijking met het effect van de aangescherpte EURO-normen.

Lange termijn keuze tussen waterstof en elektrisch vervoer nog niet duidelijk

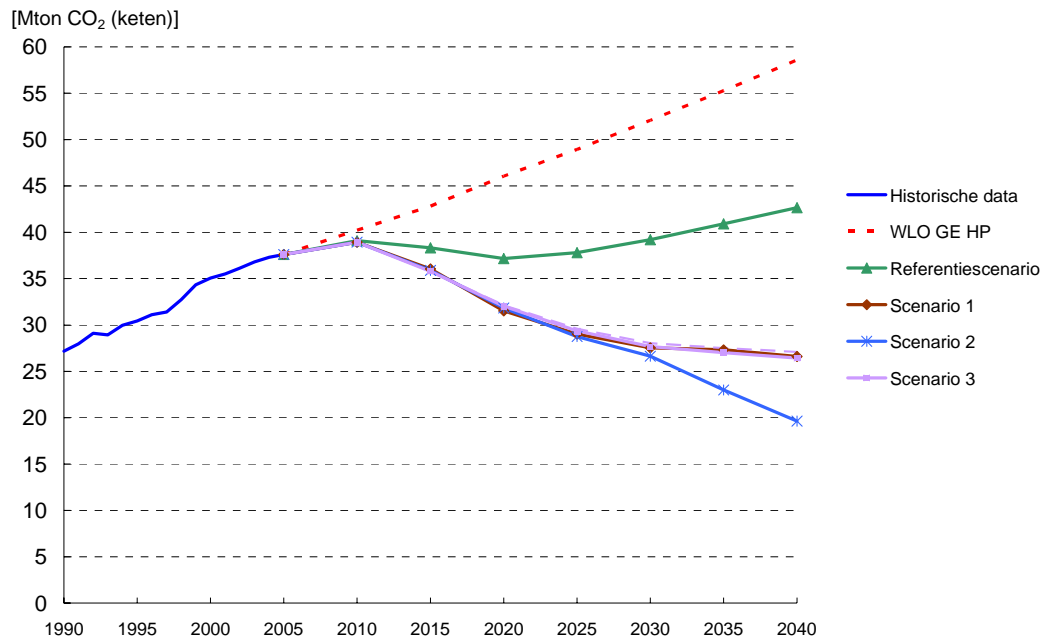
Als grotendeels klimaatneutrale energiedragers bieden waterstof en elektrisch vervoer beide een interessant toekomstperspectief met substantiële energiebesparing en emissiereductie. Waterstof heeft wellicht een iets groter emissie reductiepotentieel², maar vergt ook een ingrijpender sys-

¹ In deze studie worden, tenzij anders vermeld, emissies altijd bepaald op een 'Well-to-Wheel' basis van het brandstofverbruik voor in Nederland gereden kilometers (NL-methode). De IPCC-methode die emissies per land bepaalt op basis van de brandstofafzet en houdt, in tegenstelling tot de hier gebruikte methode, geen rekening met de zogenaamde 'Well-to-tank' emissies, zie Bijlage C voor details.

² Voor waterstof is als uitgangspunt een productieroute gekozen die erg dicht bij de meest duurzame productieroute ligt, omdat bij een sterk toenemende vraag naar duurzame waterstof vanuit de transportsector, er veel nieuwe productiecapaciteit zal worden gebouwd. Bij elektriciteit is de manier waarop de toegenomen vraag wordt ingevuld afhankelijk van het laadmoment. Hierbij is niet te voorkomen dat die deels vanuit bestaande (minder duurzame) centrales geleverd zal worden. Daarom is uitgegaan van het parkgemiddelde.

teemwijziging. Elektrisch vervoer zou eerder marktrijp kunnen zijn, maar de emissiereductie is sterk afhankelijk van de productiewijze. Bij een sterke verduurzaming van de elektriciteitssector in combinatie met een sterke verbetering van de actieradius, kan elektrisch vervoer een vergelijkbare reductie behalen als waterstof.

De transitiepaden elektrisch vervoer en waterstof sluiten elkaar overigens niet uit. Wel kan er sprake zijn van versnipperde financiering, waardoor beide uiteindelijk langzaam gerealiseerd worden, en waterstof wellicht helemaal niet. Op lange termijn zijn ook combinaties mogelijk. Te denken valt aan het doorontwikkelen van de plug-in hybride, met het vervangen van de verbrandingsmotor door een brandstofcel, die de accu oplaadt. Afhankelijk van kosten en performance ontwikkeling zal er een verdeling ontstaan tussen de brandstofcelauto, de elektrische auto en de plug-in hybride.



Figuur S.1 CO₂-ketenemissie wegverkeer (NL methode)

Noot: Scenario 1 = Generieke innovatie, Scenario 2 = Technologie specifieke innovatie (waterstof), Scenario 3 = Technologie specifieke innovatie (elektrisch vervoer)

Innovatie ontkoppelt vervoersgroei en emissies tot na 2040

Tussen 1990 en 2040 groeit het wegverkeer in het achtergrondscenario met ongeveer 95%, bijna een verdubbeling. Door de verregaande emissiereducties als gevolg van innovatie op diverse fronten kan deze groei gerealiseerd worden zonder een stijging van de ketenemissies. Het enige segment waar de ont koppeling niet volledig tot stand gebracht wordt, is het vrachtverkeer. Dit wordt deels veroorzaakt door de in deze studie gebruikte set van innovatieve technologieën, die voornamelijk toepasbaar zijn bij lichte voertuigen en autobussen. Technieken die wellicht aan zo'n ont koppeling bij kunnen dragen, zoals het meer stroomlijnen van vrachtwagens, gewichtsreductie of winnen van energie uit restwarmte, vallen buiten de scope van deze studie.

Grote afhankelijkheid van productieroute van biobrandstoffen, waterstof en elektriciteit

In alle ontwikkelde innovatiescenario's wordt benzine en diesel grotendeels vervangen door alternatieve energiedragers. De emissiefactoren van de betreffende energiedragers zijn sterk afhankelijk van de gekozen productieroute. Indien de waterstof en elektriciteit niet voldoende

klimaatneutraal is geproduceerd³, of de biobrandstoffen voor een groter deel uit 1^e generatie biobrandstoffen bestaan, zal een substantieel deel van de verwachte emissiereductie niet gerealiseerd kunnen worden. In dat geval kunnen in 2040 de ketenemissies van het wegverkeer zelfs weer boven het niveau van 1990 liggen.

Bij gebrek aan innovatiesucces biedt verdieseling geen alternatief

Binnen het referentiescenario vindt op de achtergrond al een bepaalde mate van verdieseling plaats onder de personenauto's. Een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd waarin nog meer benzine personenauto's vervangen worden door auto's met een efficiëntere dieselmotor. Zelfs bij een aandeel van dieselveertuigen in de verkeersprestatie dat stijgt tot 80%, is de emissiereductie beperkt tot 0,5 Mton (1,1 Mton indien de reductie in het achtergrondscenario ook mee wordt gerekend). Deze reductie van 3% is geen alternatief voor de substantiële emissiereducties die met de innovatiescenario's bereikt kunnen worden.

S.3. Transitiepaden: Welke bijdrage leveren specifieke innovaties?

Vier transitiepaden met sterk variërend reductiepotentieel...

In deze studie zijn de vier transitiepaden uit het programma 'De Auto van de Toekomst gaat rijden' in detail beschouwd op hun mogelijke bijdrage aan emissiereducties. Onderstaande tabel geeft een overzicht van dit reductiepotentieel per transitiepad, waarbij bandbreedtes zijn aangegeven op basis van achterliggend innovatiescenario⁴ of op basis van verschillende uitgangspunten voor de wijze van produceren (bij waterstof en elektriciteit).

Tabel S.1 *CO₂-ketenemissie reductiepotentieel van de vier transitiepaden (NL-methode)*

| [Mton CO ₂ (keten)] | Variant | Uitgangspunt | 2020 | 2030 | 2040 |
|--|---------|------------------------------------|------|------|------|
| Biobrandstoffen ⁵ | Min | Scenario 2 | 1,3 | 2,4 | 2,9 |
| | Max | Scenario 1 | 2,6 | 5,0 | 5,6 |
| Waterstof | Min | Uit aardgas zonder CCS | 0,3 | 1,0 | 2,8 |
| | Basis | Uit aardgas met CCS | 1,1 | 4,7 | 13,4 |
| | Max | H ₂ o.b.v. hout of wind | 1,2 | 5,0 | 14,2 |
| Elektrisch vervoer inclusief plug-in hybrides ⁶ | Min | Kolen (zonder CCS) | 0,4 | 1,6 | 2,3 |
| | Basis | Gemiddeld productiepark | 0,6 | 3,7 | 7,4 |
| | Max | Duurzaam (100% CCS) | 1,6 | 6,9 | 10,9 |
| Energiebesparende ICT | Min | Scenario 1 | 0,8 | 2,0 | 3,0 |
| | Max | Scenario 2 | 1,3 | 2,5 | 3,3 |

NB: De reducties mogen niet zomaar bij elkaar opgeteld worden. De reden hiervoor is dat ze niet allemaal binnen hetzelfde scenario bepaald zijn, en elkaars potentieel beïnvloeden. Ook zijn er nog andere innovatieve technologieën met een bijdrage aan het reductiepotentieel, die niet in deze tabel zijn opgenomen.

... met een verschillend toekomstperspectief...

Op korte termijn zijn alleen substantiële CO₂-emissiereducties te verwachten van biobrandstoffen en energiebesparende ICT. Dit kan helpen om aan de Nederlandse 2020 doelstellingen te voldoen boven het reeds ingezette of voorziene beleid (inclusief Europese CO₂ normstelling). Om ook in 2040 een substantiële reductie te bereiken voor de transportsector, waarbij de doorgaande mobiliteitsgroei meer dan gecompenseerd wordt, zijn innovatieve technologieën nodig

³ De veronderstelde productieroutes gaan uit van een substantiële bijdrage van CO₂ afvang en opslag (CCS). Indien deze technologie, die momenteel nog in de ontwikkelingsfase is, niet succesvol doorbreekt, zal er een groter beroep op hernieuwbare energiebronnen gedaan moeten worden.

⁴ Voor de bandbreedte van biobrandstoffen en energiebesparende ICT zijn Scenario 1 en Scenario 2 geselecteerd. Biobrandstoffen komen wel degelijk voor in Scenario 3. Ze hebben in Scenario 3 een vergelijkbaar reductiepotentieel als Scenario 2.

⁵ Het reductiepotentieel voor biobrandstoffen veronderstelt een duurzame productie zonder indirecte effecten als gevolg van veranderend landgebruik. In deze studie betreft dit transitiepad alleen vloeibare biobrandstoffen.

⁶ Indien ook de besparing door hybrides (geen plug-in) aan dit transitiepad wordt toegerekend, neemt het reductiepotentieel toe. De besparing is onafhankelijk van de productieroute van elektriciteit en bedraagt ongeveer 1,5 Mton (op basis van scenario 3). Het reductiepotentieel voor de basisvariant stijgt dan van 2,0 Mton (2020) via 5,4 Mton (2030) tot 9,0 Mton (2040).

die een grote bijdrage kunnen leveren, zoals waterstof of elektrisch vervoer. Deze twee innovaties zijn echter allebei nog niet commercieel beschikbaar, en vergen bovendien een systeeminnovatie binnen de transportsector. Indien, zoals in de achterliggende scenario-beelden, tijdig begonnen wordt met de vervanging van het wagenpark, kan in 2030 al een substantiële bijdrage worden geleverd door deze innovaties. Door verdere penetratie zal in 2040 het effect van een succesvolle doorbraak van één van deze twee technologieën veel groter zijn en verreweg de belangrijkste bijdrage leveren van de in deze studie onderzochte technologieën.

... en met hun eigen impact op voorzieningszekerheid

Naast het klimaatprobleem is het verbeteren van de voorzieningszekerheid een belangrijke motivatie om in te zetten op innovatieve technologieën in de transportsector die de fossiele brandstofbehoefte verminderen. De vier transitiepaden leiden tot een duidelijke afname, maar niet allemaal in dezelfde mate:

- *Energiebesparende ICT*: energiebesparende opties werken direct door op de brandstofvraag. De impact is beperkt door de maximale hoogte van de verwachte besparing bij 100% penetratie.
- *Biobrandstoffen*: deze vorm van brandstofsubstitutie verbetert de energievoorzieningszekerheid direct, doordat zij fossiele brandstoffen vervangt door hernieuwbare brandstoffen. Deze optie heeft een grote maar uiteindelijk wel beperkte omvang. Een ‘te hoge’ vraag naar biobrandstoffen kan de markt zodanig beïnvloeden dat er minder duurzame opties op de markt verschijnen, met ongewenste bijeffecten (bv. op het vlak van landgebruik of de wereldvoedselvoorziening). Het voordeel van deze optie is dat zij in alle segmenten van het wegvervoer kan worden ingezet.
- *Elektrisch vervoer/Waterstof*: deze opties kunnen beide de directe afhankelijkheid van fossiele brandstoffen verminderen als ze uit niet-fossiele energiedragers geproduceerd worden. De impact op de voorzieningszekerheid wordt voor het grootste deel bepaald door de productieroute. Bij een grotendeels klimaatneutrale productie (duurzaam of met CCS), zal het effect hoog uitvallen door het grote potentieel van deze opties op lange termijn. Daarnaast is er een besparingseffect als gevolg van het feit dat zowel de elektrische motor als de brandstofcel een hogere efficiëntie heeft dan de interne verbrandingsmotor. Tot slot is de toegenomen flexibiliteit in grondstoffenkeuze gunstig voor de voorzieningszekerheid.

S.4. Segmenten: Welke innovaties toepasbaar binnen welk segment?

Deze studie heeft de vier belangrijkste segmenten binnen het wegverkeer in detail bekeken. Hieronder zal per segment de belangrijkste conclusie worden gegeven over welke innovaties een substantiële bijdrage kunnen leveren.

Personenauto's

Alle onderzochte innovatieve technologieën kunnen in dit voertuigenpark een aanzienlijke emissiereductie leveren. Tot 2020 zijn de reducties voornamelijk gericht op het conventionele ICE-wagenpark zelf door de penetratie van energiebesparende opties (banden met lage rolweerstand, energiebesparende ICT en hybrides) in combinatie met brandstofsubstitutie (biobrandstoffen). Pas na 2030 hebben de lange termijn opties (plug-in hybrides en waterstof of elektrisch vervoer) voldoende marktaandeel om meer dan de helft van de reductie te kunnen leveren. Met behulp van de beschouwde innovaties is in totaal 40% tot 65% van de ketenemissies in 2040 te reduceren ten opzichte van het referentiescenario. Het segment personenauto's heeft door zijn huidige omvang en het kunnen toepassen van alle innovaties het hoogste aandeel in de emissiereductie van het wegverkeer.

Bestelwagens

Voor bestelwagens gelden dezelfde opmerkingen als gemaakt voor personenauto's, alleen is de relatieve reductie in 2040 zelfs nog 5% hoger (45% tot 70%). De reden hiervoor is het zeer vergelijkbare karakter van beide wagenparken. Door het veel kleinere aandeel van bestelwagens in de verkeersprestatie is de absolute bijdrage kleiner, ongeveer een derde van de reductie door personenwagens. Wel zijn er bij bestelwagens mogelijkheden om bepaalde innovaties versneld

te laten ingroeien doordat zij vaak onderdeel zijn van grote wagenparken, waarvan de eigenaren (bedrijven) gevoelig zijn voor economische prikkels. Bovendien wordt een deel van het bestelwagenpark alleen lokaal ingezet. In dit segment zijn technologieën die normaal een landelijk dekkende infrastructuur behoeven (zoals waterstof en elektrisch vervoer) sneller in te voeren omdat slechts een beperkt aantal lokale vulpunten voldoende is.

Autobussen

Autobussen leveren in absolute zin een beperkte emissiereductie, van maximaal 0,4 Mton in 2040. Dit segment biedt echter door het specifieke karakter een geschikte niche om als proeftuin te dienen voor een aantal technologieën waarvoor grootschalige introductie op dit moment nog niet mogelijk of te kostbaar is, zoals waterstof. Vooral stads- en streekbussen, die iedere dag terugkeren naar een remise, kunnen met een paar goed geplaatste vulpunten overstappen naar een alternatieve brandstof zonder hoge kosten voor de infrastructuur, waardoor de kosten per voertuig zo laag mogelijk kunnen worden gehouden. Door de goede afstemmingsmogelijkheden in dit segment is het mogelijk dat er meerdere innovaties een substantieel aandeel krijgen naast elkaar, zoals waterstof en CNG. Vanwege het beperkte aantal vlooteigenaren en de vaak zeer directe relatie met de (lokale) overheid als verlener van concessies, biedt dit segment extra aanknopingspunten voor een succesvolle instrumentatie van de innovatieve technologieën. Ook biedt de aanwezigheid van een Nederlandse producent mogelijkheden om bepaalde technologieën versneld marktrijp te krijgen. Daarnaast zullen hybride stadsbussen hoge besparingen op kunnen leveren door het aantal keer dat op een rit gestopt of afgeremd moet worden.

Vrachtwagens inclusief trekkers

Het reductiepotentieel van dit segment is beperkt⁷. De relatieve reductie bedraagt slechts 20% tot 30% in 2040. Voor dit segment zijn hybrides slechts beperkt economisch rendabel toepasbaar. Op termijn wordt, mede vanwege het lange-afstand karakter van dit segment, een overstap naar waterstof of elektriciteit niet verwacht. Door deze beperkte mogelijkheden zal ICE het wagenpark blijven domineren en zijn biobrandstoffen en energiebesparende technologie de belangrijkste opties. In deze studie leveren de energiebesparende opties banden met een lage rolweerstand, energiebesparende ICT en hybrides samen ongeveer de helft van de reductie in dit segment. De andere helft wordt door biobrandstoffen geleverd. Het is te overwegen om daarom de R&D van FT diesel prioriteit te geven boven die van tweede generatie bio-ethanol.

Verder biedt dit segment goede mogelijkheden voor een snellere implementatie van energiebesparende ICT omdat huidige bestuurders al gewend zijn om op een constante (begrensde) snelheid lange trajecten achter elkaar te rijden. Op drukke trajecten zou 'vertreining'⁸ door vrachtwagens, indien gecombineerd met een aparte rijstrook, tot een substantiële reductie kunnen leiden.

S.5. Kosteneffectief innoveren: kan dat?

Kosteneffectiviteit innovatiescenario's naar € 100 per ton CO₂ in 2040...

De kosteneffectiviteit van een innovatiescenario is afhankelijk van de ontwikkeling in de kosten en het reductiepotentieel van de onderliggende transitiepaden en hun aandeel in het scenario. Veel innovatieve technologieën hebben nu nog hoge kosten, maar zullen op langere termijn door leereffecten en schaalvoordelen goedkoper worden. Maar zelfs als de maximale kostendaling bereikt is, kan er structureel sprake zijn van hogere kosten dan bij de referentietechnologie, bijvoorbeeld omdat er sprake is van een dubbele aandrijving, of gasvormige opslag. Ook zullen de nieuwe voertuigen niet in alle opzichten vergelijkbaar zijn (bijvoorbeeld actieradius, geluidsniveau of het aantal keren dat men naar een tankstation moet).

⁷ Er dient opgemerkt te worden dat er voor dit segment nog diverse andere innovaties mogelijk zijn die niet in deze studie beschouwd zijn waardoor verdergaande reducties mogelijk zijn. Voorbeelden hiervan zijn het verbeteren van de aerodynamica, gewichtsvermindering of het winnen van energie uit restwarmte.

⁸ Coöperatieve ITS maakt het mogelijk om een voertuig fictief te koppelen als een soort aanhanger aan zijn voorganger. Door het vlak achter elkaar rijden, wordt de luchtweerstand verminderd.

De kosteneffectiviteiten van de innovatiescenario's ontlopen elkaar niet veel, ze dalen van € 200-300 per ton vermeden CO₂ (keten) in 2020 tot rond de € 100 per ton in 2040. De kosten zijn bepaald vanuit een nationaal kostenperspectief, en zijn het resultaat van een stijging van de kosten van het wagenpark (van 10% in 2020 tot 15% in 2040), in combinatie met dalende brandstofkosten (tussen de 10% en 20% in 2040), deels dankzij energiebesparing.

... maar varieert sterk tussen de transitiepaden.

De transitiepaden biobrandstoffen en energiebesparende ICT hebben een veel betere kosteneffectiviteit dan de transitiepaden waterstof en elektrisch vervoer (inclusief de plug-in hybride), zie Tabel S.2. De reden hiervoor is dat introductie van deze technologieën niet leidt tot substantiële meerkosten in het wagenpark, en bij aanvang van het proces al grotendeels economisch rendabel is (energiebesparende ICT) of dat de additionele kosten ten opzichte van de alternatieven op dit moment beperkt zijn (biobrandstoffen).

Tabel S.2 *Kosteneffectiviteit voor CO₂-ketenemissies van de vier transitiepaden (NL-methode)*

| [€ per Mton vermeden CO ₂ (keten)] | 2020 | 2030 | 2040 |
|---|---------|---------|---------|
| Biobrandstoffen | 125-150 | 75-100 | 75-100 |
| Waterstof | >300 | 150-200 | 100-125 |
| Elektrisch vervoer | | | |
| - All-electric | >300 | 200-300 | 125-150 |
| - Plug-in hybride | >300 | >300 | 200-300 |
| Energiebesparende ICT | <0 | <0 | <0 |

De kost gaat voor de baat

Voor waterstof en elektrisch vervoer zullen de eerste jaren de nieuwe voertuigen nog steeds veel duurder zijn dan de referentietechnologie die zij vervangen. In de aanloopperiode kunnen leereffecten en schaalvoordelen alleen bereikt worden door toch voertuigen in de markt af te zetten, en zo het volume te creëren dat de technologie op de lange termijn goedkoper maakt. In eerste instantie zal de toename in het aantal voertuigen de daling in de meerkosten overstijgen en zullen de totale meerkosten nog toenemen (de totale meerkosten worden immers bepaald door het aantal auto's maal de additionele kosten per voertuig), waardoor de meerkosten van het totale transitiepad nog flink kunnen toenemen.

Met betrekking tot de mogelijke kostendalingen als gevolg van leereffecten is nog op te merken dat de brandstofcel nog relatief veel kan leren omdat dit een relatief nieuwe technologie is. Ook bij elektrische auto's en de plug-in hybride's worden nog forse kostendalingen verwacht indien de productie verhoogd kan worden. Wel is het zo dat het belangrijkste onderdeel (de accu) al vanuit andere toepassingen een grote innovatiedruk ondervindt, en reeds diverse kostenverbeteringen door leereffecten heeft gerealiseerd.

Emissiereductie in transportsector blijft duur, maar is noodzakelijk

De kosteneffectiviteiten van de transitiepaden en de innovatiescenario's zijn hoog in vergelijking met bijvoorbeeld de in (Menkveld et al., 2007) verwachte toekomstige CO₂-prijs van € 20-50 per ton. Kosteneffectiviteiten uit de industrie en een aantal andere sectoren liggen veelal lager. Als, zoals door de adviesraden aanbevolen wordt (Raad voor Verkeer & Waterstaat, VROM-raad, AER, 2008), ook de transportsector een bijdrage moet leveren aan de klimaatdoelen, kan de kosteneffectiviteit vergeleken worden met alternatieve mogelijkheden om emissies te reduceren binnen de transportsector. Op korte termijn is nog een aantal verbeteringen in de bestaande ICE-technologie mogelijk om zo, met een beperkte toepassing van hybrides in het achtergrondscenario, de Europese norm van 130 gram CO₂ per km te halen. Op dit moment is er geen uitzicht dat op lange termijn opnieuw grote besparingstappen gemaakt kunnen worden bij op ICE-gebaseerde technologie op fossiele brandstoffen, tenzij bijvoorbeeld naar kleinere voertuigen overgestapt wordt. De bestudeerde transitiepaden met relatief lage kosteneffectiviteiten op termijn kunnen dan een oplossing bieden, mits hier tijdig mee begonnen wordt.

Kosteneffectiviteit verbetert sterk bij hogere fossiele brandstofprijzen

Een beperkte gevoeligheidsanalyse voor de kosteneffectiviteit is gedaan op basis van 50% hogere prijzen voor aardgas en ruwe olie⁹. Door de hogere prijs van fossiele brandstoffen neemt het verschil met biobrandstoffen af. Ook de prijs van waterstof (gemaakt uit aardgas) neemt toe, maar de prijs van elektriciteit is deels van kolen en duurzaam afhankelijk en neemt minder toe. Door de hogere brandstofprijzen worden de investeringen in energiebesparing ook rendabeler. De kosteneffectiviteiten van alle innovatiescenario's verbeteren daarom sterk tot rond de € 75 per ton vermeden CO₂ in 2030 en € 50 per ton in 2040. Gezien de onzekerheidsmarge rond de gebruikte cijfers betekent dit dat ze in 2040 aan het punt van rentabiliteit raken. Binnen de transitiepaden zijn hier nog wel verschillen, en hierdoor heeft Scenario 2 met het hoge aandeel uit aardgas geproduceerde waterstof slechts een beperkte afname in brandstofkosten.

S.6. Implicaties voor beleid

Innovatiebeleid moet passen bij de fase waarin de technologie zich bevindt

De keuze van beleidsinstrumenten is sterk gerelateerd aan de fase waarin de ontwikkeling van de technologie zich bevindt. De technologieën in de transitiepaden vallen grofweg uiteen in twee groepen. Een groot deel van de technologieën - tweede generatie biobrandstoffen, elektrisch vervoer, waterstof in brandstofcelvoertuigen, coöperatieve ITS - bevindt zich momenteel in de demonstratiefase. Daarnaast is er een tweede groep van technologieën die zich al in de markt bevindt: hybride auto's en bepaalde energiebesparende ICT apparatuur in de auto. In Tabel S.3 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste uitdagingen in de vier transitiepaden. De snelheid waarin de ontwikkelingsfasen doorlopen worden zal verschillen. Zo zal het bij waterstof tot 2020 duren voordat begonnen kan worden met grootschalige uitrol, terwijl dat bij elektrisch vervoer mogelijk sneller zal gaan.

In de demonstratiefase vereist de opschaling van prototype naar demonstratieprojecten nog substantiële R&D-inspanningen. Het is in deze fase van belang om marktpartijen en technologie ontwikkelaars een lange termijn perspectief te bieden, bijvoorbeeld door het stellen van doelstellingen. Vanaf het einde van de demonstratiefase, wanneer de overgang naar 'early markets' gemaakt wordt, zullen de kosten gaan dalen als gevolg van schaalvoordelen en leereffecten.

Verschillende technologieën, zoals hybride voertuigen en eerste generatie biobrandstoffen, bevinden zich al wel in early markets of verder. Voor deze technologieën zijn de belangrijkste aangrijpingspunten voor stimulering te vinden in het fiscale stelsel rond autobezit en -gebruik. Het is belangrijk om per technologie de balans te zoeken tussen steun aan voertuig en brandstof. Om overstimulering te voorkomen, is het noodzakelijk om het marktaandeel en de kostendaling van een voertuig of technologie te monitoren en de steunniveaus tijdig bij te stellen. Verder is er bij het geven van financiële steun een lange adem nodig. (Schoots en Jeeninga, 2008) hebben laten zien dat het budget voor stimulering in eerste instantie sterk oploopt, omdat de kostendaling afhankelijk is van de behaalde volumes. De piek in stimuleringsuitgaven doet zich voor op het moment dat de kostendaling van de technologie al halverwege is.

⁹ De gevoeligheidsanalyse heeft alleen de invloed van de gewijzigde brandstofkosten meegenomen, en veronderstelt geen wijzigingen in de verkeersprestatie of de penetratie van energiebesparende opties.

Tabel S.3 *Belangrijkste uitdagingen per transitiepad*

| Voertuig | Brandstof / infrastructuur | Algemeen |
|---|---|---|
| <i>Transitiepad: Biobrandstoffen</i> | | |
| Voor benzine-auto's: overgang naar flexi-fuel vloot | <p>1^e generatie - beschikbaarheid duurzame grondstoffen</p> <p>2^e generatie - technologische ontwikkeling:</p> <ul style="list-style-type: none"> • FT diesel: grootschalige biomassavergassing en conditionering syngas, hoge kosten • Bio-ethanol: ontsluiting cellulose uit grondstof en kosten enzymen <p>Aanleg vulpunten voor E85 en eventueel B100 (alleen nodig voor 1^e generatie biodiesel)</p> | <p>Duurzaamheidsaspecten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • broeikasgasbalans • food vs. fuel • indirecte effecten via landgebruik <p>Werkbaarheid vs. brede dekking van certificeringssystemen</p> |
| <i>Transitiepad: Waterstof</i> | | |
| <p>Technologische ontwikkeling brandstofcelauto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aandrijflijn • Opslag H₂ in auto • Levensduur en materiaal brandstofcel <p>Initieel hoge meerkosten.</p> | <p>Aanleg en kosten distributie infrastructuur:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Initieel in vloeibare vorm (tankwagens) • Hoge aanloopverliezen bij anticiperen op groei • Juridische en ruimtelijke aspecten bij aanleg pijpleidingen <p>Productie schone H₂:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Demonstratie en opschaling biomassavergassing • Demonstratie en opschaling CCS | <p>Onderlinge afstemming ontwikkeling onderdelen van de keten (productie, infrastructuur, vraag)</p> |
| <i>Transitiepad: Hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer</i> | | |
| <p>Ontwikkeling accu:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prijs en levensduur • veiligheid en milieuaspecten • energiedichtheid en gewicht <p>Ontwikkeling aandrijving en elektromotor</p> <p>Typekeuring</p> | <p>Aanleg oplaad infrastructuur</p> <p>Ontwikkeling faciliteiten voor snelladen of wisselaccu's</p> <p>Inpassing in elektriciteitsnet</p> <p>Productie schone elektriciteit</p> | <p>Standaardisatie infrastructuur.</p> <p>Flexibele keuze elektriciteitsleverancier</p> |
| <i>Transitiepad: Energiebesparende ICT</i> | | |
| Technologie ontwikkeling | <p>Technische standaard voor communicatie</p> <p>Aanleg communicatie infrastructuur langs wegen</p> | <p>Gebruikersacceptatie</p> <p>Aansprakelijkheidswetgeving</p> |

Transitiebeleid is in eerste instantie technologie specifiek

Voor de meeste transitiepaden is op dit moment nog 'maatwerk' nodig om de verschillende barrières te kunnen slechten, zoals verder uitgewerkt in Tabel S.4. Generiek beleid, zoals emissiehandel is nog niet geschikt, omdat het vooral prikkels bevat voor technologie die al dicht bij de markt is, en daardoor vooral incrementele verbeteringen stimuleert. Met betrekking tot het belang van de diverse uitdagingen, geldt dat de kosten voor een infrastructuur per voertuig meestal lager dan zijn dan de additionele kosten voor het voertuig. De meerkosten van het voertuig en eventueel hogere kosten voor de brandstof (bijvoorbeeld waterstof) zullen vaak doorslaggevend zijn voor het kostenplaatje van een transitie en daarmee de kans op succes mede bepalen.

Tabel S.4 *Instrumentatie korte termijn per transitiepad en aangrijpingspunt*

| Voertuig (bezit of gebruik) | Brandstof / infrastructuur | Flankerend beleid |
|--|---|---|
| <i>Transitiepad: Biobrandstoffen</i> | | |
| BPM-korting of subsidie voor flexi-fuel voertuigen (E85) | Verplichting of accijnsvrijstelling; differentiatie o.b.v. CO ₂ Subsidie vulpunten E85 | Certificering duurzaamheid, eventueel met minimale CO ₂ prestatie-eis R&D-steun 2 ^e generatie, i.s.m. private partijen Ondersteuning investeringsrisico's 2 ^e generatie Versterken landbouw |
| <i>Transitiepad: Waterstof</i> | | |
| Grootschalige demonstratieprojecten met compensatie meerkosten voertuig | Demonstratiefase: Subsidie brandstof Subsidie vulpunten <i>Later bij uitrol: eisen in concessie</i> | R&D-ondersteuning, perspectief bieden aan industrie Stimuleren schone productie <i>Later: toegang tot binnensteden, preferente parkeerplaatsen etc.</i> |
| <i>Transitiepad: Hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer</i> | | |
| Voor hybride: BPM-korting of subsidie Voor PHEV en EV: Grootschalige demonstratieprojecten met compensatie meerkosten voertuig | Kosten: lage accijns elektriciteit Aanleg oplaad infrastructuur (verplichting lokale overheid) | Toegang tot binnensteden, preferente parkeerplaatsen etc. (nu al voor hybride) Regulering keuze elektriciteitsleverancier |
| <i>Transitiepad: ITS</i> | | |
| Pilots leasevloot EU verplicht in nieuwe auto's | N.v.t. | Gebruikersacceptatie Aansprakelijkheidswetgeving |

Internationaal perspectief

Voor een aantal onderdelen van de transitiepaden is Europese schaalgrootte of coördinatie een voorwaarde. Dat geldt allereerst voor het gecoördineerd ontwikkelen en op de markt brengen van voertuiginnovaties (elektrisch, waterstof, ITS) met zodanige schaalgrootte, dat zij R&D-investeringen en verdere kostendaling door opschaling mogelijk maakt. Hierbij moet zowel ondersteuning worden gegeven op het gebied van R&D in de precompetitieve fase als op het gebied van grootschalige demonstratie en ontwikkeling van 'early markets'. Belangrijk hierbij is dat de verschillende instrumenten op elkaar aansluiten, zodat de overgangen tussen de verschillende fases soepel kunnen verlopen, en de zogenaamde 'valley of death' vermeden wordt. De industrie zal pas een substantieel deel van haar eigen R&D-geld gaan gebruiken voor een lange termijn optie indien er voldoende marktperspectief is. De R&D-prikkels moeten Europees worden gecoördineerd, evenals de marktontwikkeling. Iets soortgelijks geldt voor het verder ontwikkelen van 2^e generatie biobrandstoffen technologie, waar momenteel al veel internationale marktpartijen aan werken.

Daarnaast kunnen er op Europees niveau eisen gesteld worden aan het voertuigaanbod. De klimaatprestaties van voertuigen kunnen beïnvloed worden door CO₂-normering, die op dit moment in voorbereiding is. Het is van belang om ook in deze instrumenten prikkels in te bouwen die de ontwikkeling van lange termijn opties stimuleren en de inzet van R&D-fondsen niet te beperken tot conventionele (ICE-gebaseerde) technologie. Ambitieuze emissie-eisen voor nieuwe voertuigen maken dat automobiefabrikanten zich primair gaan richten op het behalen van de korte termijn doelstellingen via incrementele verbeteringen van conventionele technologie. Fa-

brikanten die deels in de doelstelling voorzien via (veel duurdere) technologie die veel beter is dan de norm, zouden hiervoor kunnen worden beloond door weegfactoren in te voeren die een toenemend gewicht krijgen naarmate een voertuig veel beter is dan de norm.

Certificering van biobrandstoffen kan, vanwege de gewenste reikwijdte van het systeem, het best Europees en bij voorkeur zelfs mondiaal toegepast worden. Met de Commissie Cramer heeft Nederland zich gepositioneerd als één van de trekkers in de discussie rond duurzaamheid van biobrandstoffen. Voor het beperken van de concurrentie tussen 1^e generatie biobrandstoffen en voedselproductie dient sterk te worden ingezet op het rationaliseren van de landbouw en het verhogen van de opbrengsten per hectare. Omdat de grootste mogelijkheden daarvoor buiten Nederland liggen, vereist dit minimaal een aanpak op EU-niveau. Ook hiervoor geldt overigens dat Nederland een sterke reputatie heeft op het gebied van landbouw en ontwikkeling, en een agenderende rol kan vervullen.

Tenslotte zal er, vanwege het internationale karakter van de transportsector, wet- en regelgeving moeten worden ontwikkeld of geharmoniseerd op het gebied van veiligheid, typekeuringen, en aansprakelijkheid. Ook is er behoefte aan Europese ICT-standaarden voor het opladen van elektrische voertuigen, het communiceren met de elektriciteitsleverancier, en communicatie tussen voertuigen en de 'wegkant'.

Wat kan Nederland doen?

Nederland kan geen winnaar kiezen, maar binnen de koers die Europa vaart, strategische keuzes maken die de nationale belangen het beste dienen. Zoals al aangegeven, kan Nederland agenderend bezig zijn op het gebied van duurzaamheid van biobrandstoffen en versterking van de landbouw. Ook kan Nederland coalities vormen met andere landen om invloed uit te oefenen op het Europese beleid, bijvoorbeeld het standaard maken van flexi-fuel modellen voor nieuwe auto's, of voor scherpe CO₂-normen voor voertuigen. Het is hierbij belangrijk om oog te hebben voor het spanningsveld tussen voortschrijdende normstelling en systeeminnovatie. Korte termijn beleid (optimalisering van bestaande voertuigen) mag niet leiden tot negatieve effecten op innovatie-inspanningen. Gegeven het voertuigaanbod, kan Nederland vervolgens de vraag stimuleren naar de voertuigen met de beste klimaatprestaties en de vraag ontmoedigen naar de minst klimaatvriendelijke voertuigen. Ook kan Nederland op korte termijn inzetten op robuuste opties zoals hybride voertuigen, in-car ITS, en banden met lage rolweerstand. Nederland heeft al met succes fiscale instrumenten - BPM-korting en lagere bijtelling voor leaserijders - gehanteerd om hybride auto's te stimuleren.

Er is ook een aantal niches waar Nederland een voortrekkersrol kan spelen. Op het gebied van stadsbussen kan Nederland via specifieke beleidsmaatregelen (bijvoorbeeld via criteria in de aanbesteding van openbaar vervoer) een markt voor brandstofcelbussen creëren. Parallel daaraan kan de Nederlandse industrie gestimuleerd worden, zoals nu al plaats vindt, om een brandstofcel bus te ontwikkelen. Het is hierbij essentieel om de ontwikkeling van de vraag aan te laten sluiten bij de ontwikkeling van het aanbod. De Nederlandse overheid loopt Europees voorop in het invoeren van de kilometerbeprijzing en heeft internationaal een sterke positie op het gebied van hightech systemen en materialen. Dit biedt kansen voor ITS, en andersom heeft Nederland, als dichtbevolkt land, ook belang bij een verdere ontwikkeling van ITS-opties die de doorstroming en veiligheid bevorderen. Het is relatief eenvoudig om hierbij de energiebesparende ITS-opties ook te stimuleren, tenzij een verbeterde doorstroming leidt tot een groei van het verkeersvolume.

Voor de introductie van elektrische of brandstofcelvoertuigen in Nederland, is Nederland allereerst afhankelijk van de keuze die de grote automobielfabrikanten maken. Deze beslissingen zijn alleen te beïnvloeden op Europees niveau, maar zouden bij voorkeur aan moeten sluiten bij ontwikkelingen in de VS en Japan. Wel kan Nederland relatief zelfstandig beleid ontwikkelen voor de opbouw van de bijbehorende infrastructuur van oplaadpunten voor elektriciteit of waterstof vulpunten. Vooruitlopen op de muziek heeft hierbij geen zin; het is vooral een kwestie van in de pas lopen. De grootschalige introductie van elektrisch rijden lijkt, doordat de verandering in het energiesysteem en voertuig minder ingrijpend is, iets dichterbij dan die van rijden op

waterstof, maar voor beide geldt dat er nog innovaties op diverse fronten (technologie, infrastructuur) nodig zijn. Nederland kan daarom met beide technologieën ervaring opdoen in demonstratieprojecten, en early markets creëren in samenwerking met wagenparkbeheerders en openbaar vervoer bedrijven. Lokale overheden kunnen hierbij een sleutelrol spelen.

Hoewel een keuze voor waterstof of elektrisch op dit moment nog prematuur lijkt, is het wel verstandig als Nederland binnen de transitiepaden prioriteiten stelt en de beperkte middelen strategisch inzet. Hierbij hoort ook het vermijden van een lock-in. Recentelijk is de aandacht voor het stimuleren van het rijden op aardgas (CNG) toegenomen. Vervanging van de ene fossiele brandstof (olie) door een andere (aardgas) heeft echter slechts beperkte voordelen voor het klimaat en de voorzieningszekerheid, en dan vooral op de korte termijn. Rijden op aardgas kan wel een bijdrage leveren aan verbeterde luchtkwaliteit, zeker voor stadsbussen. Echter, met de aanscherping van de EURO-normen worden conventionele voertuigen ook steeds schoner. Rond 2015 zal het extra milieuvoordeel van nieuwe CNG voertuigen daarom veel kleiner zijn. Het lange termijn perspectief van CNG zou daarom vooral gezocht moeten worden in een transitie naar rijden op groen gas. Het potentieel voor biogas uit vergisting van reststromen is beperkt, en zou rond de 10% van de energievraag van het wegverkeer kunnen dekken, mits niet voor andere sectoren ingezet. Voor het meerdere is deze transitie afhankelijk van SNG uit geïmporteerde biomassa, die ook als vloeibare brandstof (FT diesel) of voor duurzame elektriciteitsproductie ingezet kan worden. Voor deze biomassa geldt dezelfde duurzaamheidsdiscussie als voor vloeibare biobrandstoffen.

Conclusie

Concluderend kan gesteld worden dat het halen van de lange termijn doelen in de transportsector alleen mogelijk is via (vrijwel) nul-emissie technologie, zoals energiebesparing, duurzame waterstof en elektriciteit, en duurzame biobrandstoffen. De benodigde systeeminnovatie vergt echter meerdere decennia. Het is daarom belangrijk om de transitie in te zetten, lang voordat de grenzen van het verder optimaliseren van de interne verbrandingsmotor in zicht komen.

De meeste opties zijn nu nog in de demonstratiefase. Vanwege de schaalgrootte is Europees beleid cruciaal, en het is nog niet duidelijk welke technologie de winnaar zal blijken te zijn. Wel is duidelijk dat er, om innovaties in de markt te zetten, financiële steun nodig is gedurende een lange periode. Bovendien blijkt de aard en timing van de transitiepaden zo verschillend te zijn, dat generiek (bron) beleid niet zal voldoen. Dat impliceert dat inpassing in een (Europees) emissiehandelssysteem geen stimulans zal geven aan de technologieën die nog ver van de markt af staan.

1. Inleiding

In 2007 heeft ECN een studie uitgevoerd waarin onderzocht is wat de bijdrage van technische innovaties in voertuigaandrijving en brandstoffen kan zijn aan energiebesparing en CO₂-emissiereductie in het wegverkeer en wat de kosten daarvan zijn. Hiervoor zijn twee innovatiescenario's geconstrueerd. Naar aanleiding van deze studie is er vanuit V&W en VROM behoefte aan een vervolgstap waarbij in meer detail wordt gekeken naar de implicaties van individuele opties, met name de transitiepaden uit het programma Auto van de Toekomst en ook de mogelijke beleidsinstrumenten verder worden uitgewerkt.

Dit rapport bevat de resultaten van de vervolgstudie die in 2008 is uitgevoerd. Het doel van de vervolgstudie is het inzichtelijk maken van de instrumenten die de Nederlandse overheid kan inzetten om de gewenste innovaties voor het wegverkeer effectief en efficiënt te introduceren in Nederland. Daarnaast zal worden onderzocht hoe Nederland zijn innovatiestrategie doeltreffend kan afstemmen op het Europese energie- en klimaatbeleid voor de sector en op initiatieven uit de markt.

De innovaties die in deze vervolgstudie verder zullen worden uitgewerkt, komen overeen met vier specifieke transitiepaden van het programma Auto van de Toekomst met betrekking op het thema duurzame mobiliteit:

- Biobrandstoffen.
- Waterstof.
- Hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer.
- Energiebesparende ICT.

Voor de bovengenoemde vier transitiepaden is inzicht gewenst in de volgende aspecten:

1. Reëel ontwikkelingsperspectief.
2. Potentiële reductie in broeikasgassen en overige emissies.
3. Inzicht in kosten en kosten-effectiviteit vanuit een nationaal kostenperspectief.
4. Internationaal perspectief.
5. Toegevoegde waarde van overheid.
6. Instrumentatie.

De eerder geconstrueerde innovatiescenario's en een nieuw innovatiescenario, met een doorbraak voor elektrisch vervoer, vormen het uitgangspunt voor de eerste drie vragen. Om het lange termijn potentieel van de diverse transitiepaden te kunnen beoordelen, zijn de scenario's uitgebreid met een nieuw zichtjaar 2040. Tevens is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op het referentiescenario om te bekijken wat optimalisatie van conventionele aandrijftechnologieën kan opleveren als innovatieve technologieën niet doorbreken, waarbij een verdergaande verdieseling mogelijk nog tot een efficiëntieverbetering zal leiden.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 begint met een beschrijving van de gehanteerde aanpak, waarbij de belangrijkste uitgangspunten en onzekerheden vermeld worden. Vervolgens wordt aangegeven hoe de innovatiescenario's gebruikt zijn voor de kwantitatieve analyse voor de transitiepaden om het reductiepotentieel en de kosteneffectiviteit te bepalen.

Hoofdstuk 3 bevat een overzicht van de scenario's, met voor alle scenario's een korte omschrijving. Hoofdstuk 3 sluit af met een beschrijving van het emissiereductie potentieel en de kosteneffectiviteit van de scenario's ten opzichte van het referentiescenario.

In Hoofdstukken 4 tot en met 7 worden de vier verschillende transitiepaden behandeld: biobrandstoffen, waterstof, 'hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer' en energiebesparende ICT. Per transitiepad wordt eerst het ontwikkelingsperspectief beschreven. Vervolgens wordt

het emissiereductie potentieel en de kosteneffectiviteit voor het betreffende transitiepad gegeven. Afsluitend worden de resultaten van een analyse gedeeld naar de mogelijke instrumentatie van het betreffende transitiepad. Dit bevat een beschrijving van onder andere de huidige barrières en ontwikkelingen (inclusief het internationale perspectief), de rol van de overheid en de mogelijke instrumentatie. In Hoofdstuk 8 wordt vervolgens een beschouwing gegeven van rijden op aardgas in transitieperspectief.

Op basis van de analyse naar mogelijke beleidsinstrumenten per transitiepad, wordt in Hoofdstuk 9 een aantal conclusies gegeven die belangrijk zijn voor het succesvol instrumenteren van innovatie voor het wegverkeer. Hier wordt andere ingegaan op het belang van het kiezen van het juiste instrument (en aangrijpingspunt) op de juiste tijd.

In Hoofdstuk 10 worden de belangrijkste conclusies getoond inclusief een aantal aanbevelingen.

Het rapport bouwt in grote mate voort op het voorgaande rapport, maar kan zelfstandig gelezen worden. Wel wordt voor sommige onderdelen, met name voor de onderbouwing van bepaalde uitgangspunten, verwezen naar het voorgaande rapport. De achterliggende gegevens voor de scenario's kunnen in Bijlage A gevonden worden. Bijlage B bevat alle relevante kwantitatieve uitgangspunten, inclusief het nieuwe zichtjaar 2040. Bijlage C bevat het reductiepotentieel van de innovatiescenario's op basis van de IPCC-methode, die alleen directe emissies beschouwt. Bijlage D bevat de bevindingen van de door TNO uitgevoerde review op de kwantitatieve aspecten van deze studie. Bijlage E bevat de reactie van ECN op de TNO review.

2. Aanpak

2.1 Uitgangspunten

Om het emissiereductie potentieel van de transitiepaden te bepalen is een realistisch toekomstbeeld nodig voor het betreffende transitiepad. De huidige studie bouwt hiervoor verder op de scenario's uit de voorgaande studie (Uyterlinde et al., 2008), en is gebaseerd op dezelfde uitgangspunten (zie Bijlage A voor details, voor de toelichting wordt verwezen naar de voorgaande studie). Hieronder wordt een aantal nieuwe of gewijzigde uitgangspunten toegelicht.

In verband met het toegenomen aandeel van elektriciteit en de uitbreiding met het zichtjaar 2040, is de CO₂-emissiefactor van elektriciteit verder onderzocht. De emissiefactor is aangepast aan de verwachte ontwikkeling van de Nederlandse elektriciteitsproductie. Onderstaande tabel bevat de resulterende emissiefactoren¹⁰ (zie Bijlage A voor details).

Tabel 2.1 *Directe en ketenemissiefactoren van brandstoffen*

| CO ₂ -emissiefactor [g/MJ] | Direct | | Keten | | |
|--|-----------|------|-------|------|------|
| | 2010-2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Benzine | 72,0 | 82,8 | 82,8 | 82,8 | 82,8 |
| Bioethanol | 0,0 | 36,1 | 20,3 | 16,9 | 15,1 |
| Diesel | 74,3 | 85,4 | 85,4 | 85,4 | 85,4 |
| Biodiesel | 0,0 | 32,9 | 22,1 | 17,5 | 15,2 |
| LPG | 66,7 | 73,4 | 73,4 | 73,4 | 73,4 |
| Waterstof | 0,0 | 16,6 | 16,6 | 16,6 | 16,6 |
| CNG | 56,8 | 62,5 | 62,5 | 62,5 | 62,5 |
| Elektriciteit | 0,0 | 157 | 139 | 111 | 83,3 |

In Paragraaf 5.2 en 6.2 wordt nog een aparte gevoeligheidsanalyse gedaan voor de emissiefactor van elektriciteit en waterstof met alternatieve uitgangspunten

Buiten het aangeven van de gevoeligheid van de productieroutes, beperkt deze studie zich tot het wegverkeer. Vragen als "Wat is er nodig om de verduurzaming in de elektriciteitssector te bewerkstelligen?" vallen buiten de scope. Wel wordt er voor de emissies en het bepalen van de kosteneffectiviteit gekeken naar de 'well-to-wheel' emissies, die naast de directe CO₂-emissies ook de emissies beschouwen die plaatsvinden tijdens de hele keten van productie, transport en distributie. Hierdoor wordt de vergelijking tussen alternatieve brandstoffen (zoals waterstof, elektriciteit en biobrandstoffen) en fossiele brandstoffen eerlijker. Ook worden de resultaten dan niet geflatteerd door eventuele 'carbon leakage' als gevolg van brandstofproductie met de daarbij behorende emissies in het buitenland. Overal waar het niet specifiek vermeld is, zal met emissiereductie bedoeld worden de reductie van ketenemissies en ditzelfde geldt voor kosteneffectiviteit.

Voor de huidige studie is tevens inzicht gewenst in de overige emissies NO_x en fijnstof (PM₁₀). Nog niet alle toekomstige praktijk-emissiefactoren normen voor deze emissies zijn bekend. Paragraaf B.1.1 bevat de uitgangspunten waarmee in deze studie de overige emissies bepaald zijn, inclusief een korte toelichting.

Voor het bepalen van de kosteneffectiviteit wordt evenals in voorgaande studie gebruik gemaakt van het nationale kostenperspectief, waarbij transacties tussen actoren (bv. belastingen, heffin-

¹⁰ Bij biobrandstoffen zijn extra CO₂-emissies als gevolg van veranderd land gebruik niet meegenomen (bijvoorbeeld omzetten veenbossen naar palmolieplantages voor biodiesel). Deze indirecte emissies kunnen substantieel zijn.

gen en subsidies) niet meegenomen worden. Daarnaast wordt voor de scenario's inzicht gegeven in de externe kosten van de overige emissies. Deze zijn bepaald op basis van de Europese richtlijn/studie en bedragen 0,0044 €/g NO_x en 0,087 €/g PM (EU, 2007c).

Voor het bepalen van de kosteneffectiviteit op het detailniveau van een transitiepad, is gebruik gemaakt van emissies en kosten op basis van het Nederlandse brandstofverbruik. Voor de berekening van IPCC-emissies (op basis van brandstofafzet) zijn additionele aannames nodig. In Bijlage C is voor de innovatiescenario's het reductiepotentieel conform IPCC-methode gegeven.

2.2 Van innovatiescenario naar individuele transitiepaden

De integrale aanpak uit de voorgaande studie is voortgezet door de specifieke transitiepaden te bekijken binnen één of meerdere integrale scenariobeelden (innovatiescenario's). Als resultaat ontstaat een consistent beeld zonder dubbelstellingen. Twee transitiepaden, biobrandstoffen en ICT, zijn bekeken binnen twee scenariobeelden, om een hoog en een laag reductiepotentieel te bepalen. Overigens wil dit niet zeggen dat deze transitiepaden geen rol spelen binnen het niet-geselecteerde scenario (Scenario 3). Scenario 3 zal een reductiepotentieel hebben dat vergelijkbaar is met Scenario 2. Voor de overige transitiepaden is slechts één scenario gebruikt omdat het transitiepad in de andere scenario's geen noemenswaardige rol speelt. Onderstaande tabel toont de gebruikte koppeling tussen innovatiescenario's en de individuele transitiepaden.

Tabel 2.2 *Overzicht koppeling innovatiescenario's en individuele transitiepaden*

| Transitiepad | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| Energiebesparende ICT | X (min) | X (max) | |
| Biobrandstoffen | X (max) | X (min) | |
| Waterstof | | X | |
| Elektrisch vervoer | | | X |

Om het reductiepotentieel per transitiepad zonder dubbelstelling te bepalen zijn diverse methoden beschikbaar. In deze studie is de aanpak gebruikt waarbij de emissiereductie voor de transitiepaden binnen een scenario wordt bepaald door een volgorde te hanteren. Hiertoe zijn de verschillende innovatieve besparingsopties in de volgende drie categorieën ingedeeld:

1. Generieke besparingsopties over het gehele wagenpark (banden met lage rolweerstand, energiebesparende ICT).
2. Wagenpark vervanging (Alternatieve technologieën: CNG, H₂, Elektrisch vervoer, hybride, plug-in hybride).
3. Pure brandstofsubstitutie (Biobrandstoffen).

In iedere stap worden de genoemde transitiepaden één voor één conform de uitgangspunten van het innovatiescenario extra toegevoegd aan het referentiescenario, beginnend bij categorie 1. Op deze manier kan per optie het reductiepotentieel en de kosteneffectiviteit binnen het betreffende scenario bepaald worden. Na de toevoeging van de laatste optie (biobrandstoffen) ontstaat het betreffende innovatiescenario. Door de bovenstaande volgorde te hanteren worden de opties in categorie 1 licht geflatteerd ten opzichte van die in categorie 2. Categorie 3 staat door zijn aparte karakter (1-op-1 vervanging fossiele brandstof) qua kosteneffectiviteit los van de overige opties. Het totale reductiepotentieel is afhankelijk van het volume aan biobrandstoffen, en dit kan bij een vast doelpercentage voor de bijmenging wel afhankelijk zijn van de besparingen en alternatieve brandstoffen uit categorieën 2 en 3.

2.3 Discussie van onzekerheden

Zoals bij alle scenariostudies, zijn ook de resultaten van deze studie met de nodige onzekerheden omgeven. Allereerst wordt opgemerkt dat de innovatiescenario's voortbouwen op een specifiek achtergrondscenario, namelijk het Global Economy scenario met hogere brandstofprijzen uit de WLO-studie (CPB/MNP/RPB, 2006). Dit scenario kenmerkt zich door een relatief hoge

economische groei van 2,9% per jaar, en daarom ook een sterke groei in de mobiliteitsvraag. De huidige lagere economische groei zou kunnen leiden tot een meer gematigde mobiliteitsontwikkeling. Ook (de kans op) hoge olieprijsen zoals in eerste helft van 2008, kan hieraan bijdragen. De verkeersprestatie van de verschillende voertuigtypen en de ontwikkeling van de verhouding tussen benzine, diesel en LPG zijn gebaseerd op dit scenario. Wijzigingen in deze uitgangspunten zijn niet bekeken.

Verder is het inherent aan innovaties dat de mate van succes en het daadwerkelijke effect ervan niet bij voorbaat aan te geven is. Dat impliceert dat alle resultaten met marges beschouwd moeten worden. De mate van onzekerheid en risico in de innovatiescenario's is niet geheel vergelijkbaar. De route via hybridisering (Scenario 1) is vanuit de huidige kennis over effecten, kosten en stand van de techniek minder onzeker dan een route via waterstof (Scenario 2) of elektriciteit (Scenario 3). Daarnaast zijn er onzekerheden in de gehanteerde aannames. Zo zijn de besparingseffecten van ICT onzeker, omdat er sprake kan zijn van een 'rebound effect'. Dat wil zeggen dat een verbeterde verkeersdoorstroming, als gevolg van intelligente transportsystemen, een groei in de mobiliteit kan veroorzaken. Dit effect is in de berekeningen niet meegenomen. Ook de emissies die plaatsvinden voor de productie van elektriciteit en waterstof zijn onzeker. Bij de veronderstelde productieroutes is de CO₂-ketenemissiefactor (groten)deels afhankelijk van het slagen van CCS (CO₂-afvang en -opslag), een technologie die zich nog niet bewezen heeft. Voor deze aannames is een gevoeligheidsanalyse gedaan die de mogelijke impact op het emissie reductiepotentieel weergeeft.

Ook de gehanteerde projecties van brandstofprijzen en de kosten van het wagenpark moeten met marges beschouwd worden. Brandstofprijzen worden deels bepaald door het verloop van de ruwe olieprijs. Deze afhankelijkheid is met een gevoeligheidsanalyse bekeken. Daarnaast zal de dynamiek op de markt voor biomassa de komende jaren bepalend zijn voor de ontwikkeling van de prijzen van biobrandstoffen. De snelheid waarmee de kosten van innovatieve voertuigen zullen dalen zal afhankelijk zijn van de mate waarin leereffecten en schaalvoordelen daadwerkelijk optreden. Gezien de spreiding die bij kostencijfers voor voertuigen in de literatuur aangetroffen is, kan de feitelijke ontwikkeling van de meerprijs in de orde van 30% tot 50% afwijken. Ook zijn onderhoudskosten en verzekeringen buiten beschouwing gebleven.

Er is bij de doorrekening gekozen voor een beperkt aantal innovaties waarvan een substantieel effect en marktaandeel verwacht mag worden op termijn 2020-2030. Andere opties worden daarmee niet gediskwalificeerd¹¹. Er zijn drie innovatiescenario's geconstrueerd die allen realiseerbaar kunnen zijn, maar dat sluit vele andere mogelijkheden, zoals rijden op methanol, natuurlijk niet uit. Ook de keuze voor de vier transitiepaden moet in deze context gezien worden.

In het achtergrondscenario is bovendien slechts een beperkte efficiëntieverbetering van de huidige voertuigen verondersteld. Er zijn diverse studies die aantonen dat ook in het huidige ICE-gedomineerde wagenpark nog verbeteringen mogelijk zijn, zie bijvoorbeeld (Passier, 2008a). Een groot deel hiervan zou bij een strengere Europese norm voor de CO₂-emissie per kilometer, de efficiëntie van het wagenpark verbeteren. Een significant deel van de verbeteringen zou ook bij de innovatieve technologieën toegepast kunnen worden. Er is voor gekozen om de efficiëntie in het achtergrondscenario na 2020 constant te veronderstellen omdat zij enerzijds erg onvoorspelbaar zal zijn, en anderzijds de resultaten van de studie in relatieve zin niet wezenlijk zullen beïnvloeden. Indien een gedetailleerde raming van de absolute hoogte van de emissies voor de periode 2020-2040 gewenst is, zal hier wel degelijk rekening mee gehouden moeten worden.

Tot slot zijn er onzekerheden van een andere orde. De maatschappelijke dynamiek die zich uit in draagvlak, politieke gevoeligheid, meer of minder succesvolle lobby's en technische en organisatorische implementatiemissers zal mede het succes van duurzame innovatie in het wegverkeer bepalen. De recente discussie omtrent biobrandstoffen is hier een voorbeeld van.

¹¹ Door de keuze voor opties met een substantiële impact zijn veel opties afgevallen die slechts een beperkt segment betreffen, zoals vrachtwagens of autobussen. Hierdoor is met name voor het vrachtverkeer het reductiepotentieel van innovatieve technologieën een onderschatting.

3. Innovatiescenario's

Dit hoofdstuk beschrijft de context voor de scenario's die voor deze en voorgaande studie gebruikt zijn. Tevens zal een aantal belangrijke eigenschappen toegelicht worden. In Paragraaf 3.2 worden het emissiereductie potentieel en de kosteneffectiviteit voor de scenario's getoond. In Bijlage A wordt een overzicht gegeven van de marktaandeelen van de diverse innovaties in de vervoersprestatie van het referentiescenario en de drie innovatiescenario's, zie Tabel A.1.

3.1 Overzicht scenario's

3.1.1 Referentiescenario

Het referentiescenario heeft als achtergrondbeeld de hoge prijs variant van het WLO-GE scenario (WLO GE HP) en komt verder overeen met de lage variant in de beoordeling van het beleidspakket Schoon en Zuinig voor het wegverkeer, zoals gekwantificeerd in (Menkveld et al., 2007). Dit correspondeert met:

- 10% duurzame biobrandstoffen in 2020 en daarna.
- 9% hybride auto's in 2020 en een verbetering van de efficiency van auto's als gevolg van Europese CO₂-normering voor personenauto's (130 gr/km in 2015 en daarna).

Ook zijn effecten ingeboekt van de volgende maatregelen¹²:

- Kilometerbeprijzing.
- Europese CO₂-normering voor bestelauto's met ruime normen.
- Fiscale vergroening mobiliteit.
- Voorlichting over gedragsverandering.

In de kabinetsplannen worden nog meer maatregelen genoemd, waarvoor in (Menkveld et al., 2007) nog geen effectschatting gegeven kon worden, omdat er eerst nader onderzoek nodig is. Uiteraard zijn deze maatregelen hier buiten beschouwing gebleven, evenals maatregelen die zich richten op het niet-wegverkeer. De referentie is ook niet aangepast aan recente aanpassingen in het beleid, zoals de bijstelling van het verplichte aandeel biobrandstoffen.

Middels een gevoeligheidsscenario op het referentiescenario, zal bepaald worden of een verdergaande 'verdiepseling' van het personenautopark nog een substantiële emissiereductie kan opleveren voor het geval dat innovatie niet van de grond komt in Nederland en Europa. Een toelichting op deze gevoeligheidsanalyse volgt in Paragraaf 3.2.

3.1.2 Scenario 1: generieke innovatie

Er is in Europa en Nederland maatschappelijk draagvlak en beleid voor innovatie, maar er is beperkte coördinatie, waardoor er technologisch wordt voortgebouwd op de interne verbrandingsmotor. Duurzame biobrandstoffen voorzien in 2020 in 20% van de vraag naar transportbrandstoffen in het wegverkeer, en er vindt verdere groei plaats tot een aandeel van 30% in 2030, waarna de absolute hoeveelheid stabiel blijft. Ook treedt er een verschuiving op van eerste generatie biobrandstoffen naar de tweede generatie met een betere CO₂-prestatie. Het aandeel van tweede generatie biobrandstoffen groeit van 50% in 2020 tot 75% in 2040. Banden met lage rolweerstand en energiebesparende ICT worden op grote schaal toegepast, maar minder dan in Scenario 2 en Scenario 3, waar meer Europese coördinatie is. Waterstof en elektrisch vervoer

¹² Voor de maatregel 'openstellen concessiestelsel openbaar vervoer voor innovaties' is in het referentiescenario geen effect opgenomen, omdat dit overlapt met de innovatiescenario's. In (Menkveld et al., 2007) is het effect overigens zeer beperkt (0,05 Mton).

spelen geen rol van betekenis doordat het ontbreken van coördinatie op internationaal niveau, de benodigde grote transitie onmogelijk maakt.

Voor personenauto's betekent dit dat de hybride auto dominant wordt, zie Figuur 3.1. De plug-in hybride is voorzichtig in opkomst. Het aandeel van aardgasauto's groeit naar zo'n 10% in 2030 omdat Nederland hier op inzet. De scenario's zijn doorgerekend met CNG. Voor een gevoeligheidsanalyse naar het effect van vervanging van CNG door biogas wordt verwezen naar Hoofdstuk 8.

Bestelauto's zijn hybride/(bio)diesel of rijden op CNG, zoals zichtbaar in Figuur 3.2. Een substantiële doorbraak van de plug-in hybride is niet voorzien voor 2030, maar na 2030 weet de plug-in hybride relatief snel een redelijk aandeel te verwerven. Dankzij de innovatieconcessies zijn stad- en streekbussen hybride of rijden op CNG. Er is ook een beperkt aandeel waterstofbussen, omdat de meerkosten daarvan te overzien zijn. De verkeersprestatie, per brandstof, is voor bussen weergegeven in Figuur 3.3. Touringcars rijden lange afstanden op (bio)diesel, evenals vrachtwagens. In de stad is er ook sprake van hybride vrachtwagens.

3.1.3 Scenario 2: technologie-specifieke innovatie - Waterstof

In Scenario 2 zetten de verschillende lidstaten van Europa, waaronder Nederland, gecoördineerd in op innovatie. Doordat er keuzes worden gemaakt voor waterstof en brandstofceltechnologie, zowel wat betreft de ontwikkeling van als de vraag naar de technologie, kan waterstof doorbreken.

Vanaf 2020 speelt waterstof op macro niveau een rol, en deze rol zal na 2030 verder groeien. De groei van waterstof dempt de groei van biobrandstoffen in Scenario 2 vergeleken met Scenario 1 omdat een deel van de beschikbare biomassa voor waterstofproductie wordt gebruikt. Biobrandstoffen voorzien in 2030 in 20% van de vraag naar transportbrandstoffen, waarna een stabilisatie plaatsvindt in absolute zin. Door de afnemende vraag naar fossiele brandstoffen zal het relatieve aandeel na 2030 nog wel stijgen. Stille, zuinige banden, en energiebesparende ICT worden vanwege de Europese coördinatie op grote schaal toegepast, meer dan in Scenario 1.

Er vindt een specialisatie in de markt plaats: waterstof bij lichte voertuigen en bussen, biobrandstoffen in vrachtvervoer en touringcars. In 2030 is het marktaandeel van de brandstofcelauto op waterstof in de verkeersprestatie van personenauto's en bestelwagens substantieel (20 tot 25%). De hybride auto groeit fors, maar iets langzamer na 2020, omdat deze wordt opgevolgd door de brandstofcelauto, zie ook Figuur 3.1. Na 2030 zal de brandstofcelauto verder doorgroeien tot een aandeel in de verkeersprestatie van rond de 60% in 2040. Dit aandeel kan op termijn nog verder groeien omdat in 2040 75% van de nieuwverkopen voor personenauto's en bestelwagens een brandstofcelauto betreft.

3.1.4 Scenario 3 en 3*: technologie-specifieke innovatie - Elektrisch vervoer

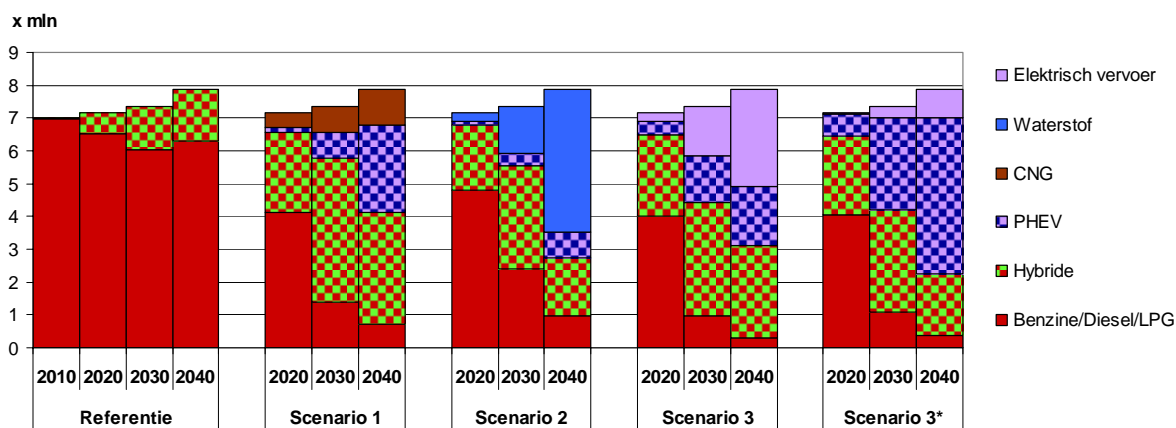
Scenario 3 is qua context vergelijkbaar met Scenario 2. Voor de doorbraak van elektrisch vervoer moeten de verschillende lidstaten van Europa gecoördineerd inzetten op innovatie. Alleen valt in dit scenario de uiteindelijke keuze op elektrisch vervoer, mogelijk deels afgedwongen door marktinitiatieven. Zie Paragraaf 6.1 voor een gedetailleerde schets van het ontwikkelingsperspectief. Elektrisch vervoer zal pas vanaf 2020 een rol gaan spelen, met de plug-in hybride als voorloper.

De ontwikkeling van biobrandstoffen, ICT en stille zuinige banden is vergelijkbaar met Scenario 2. Door de benodigde extra vraag naar (duurzame) elektriciteit zal ook hier slechts een beperkt deel van de beschikbare biomassa beschikbaar blijven voor biobrandstoffen.

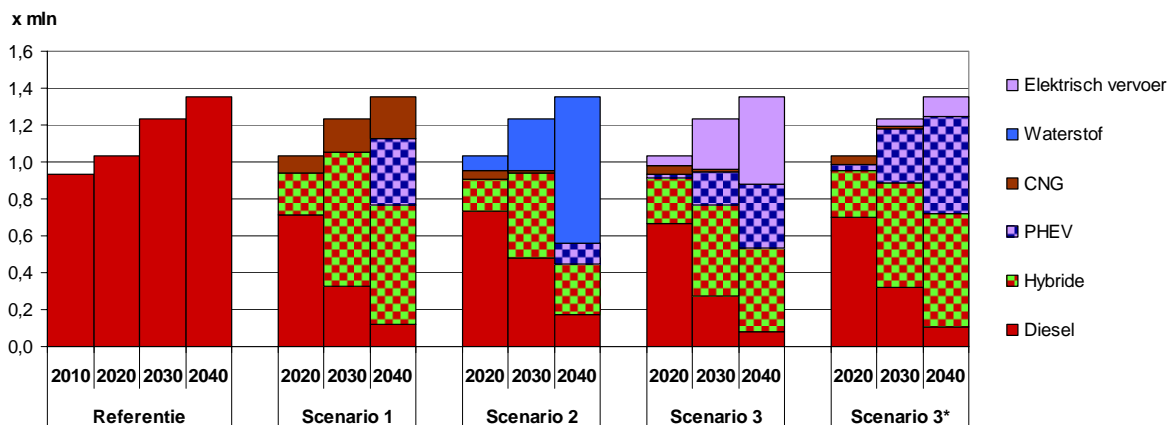
Ook in dit scenario vindt een specialisatie plaats: elektrisch vervoer bij de lichte voertuigen, biobrandstoffen in bussen en vrachtvervoer (deels in hybride uitvoering). Vanwege de beperktere

actie-radius in combinatie met een veel langere oplaadtijd, wordt het aandeel elektrisch vervoer (exclusief plug-in hybrides) wat lager ingeschat dan bij waterstof mogelijk is. In 2040 bedraagt het aandeel in de vervoersprestatie voor personenauto's en bestelwagens rond de 35%. Daarnaast is het resterende lichte voertuigenpark wel nagenoeg volledig gehybridiseerd, met bijna de helft als plug-in hybride uitvoering. Gecombineerd met het aandeel elektrisch vervoer wordt in dit scenario ongeveer de helft van alle kilometers van lichte voertuigen in 2040 op elektriciteit gereden. Zie Figuur 3.1, Figuur 3.2 en Figuur 3.3 voor een grafische weergave.

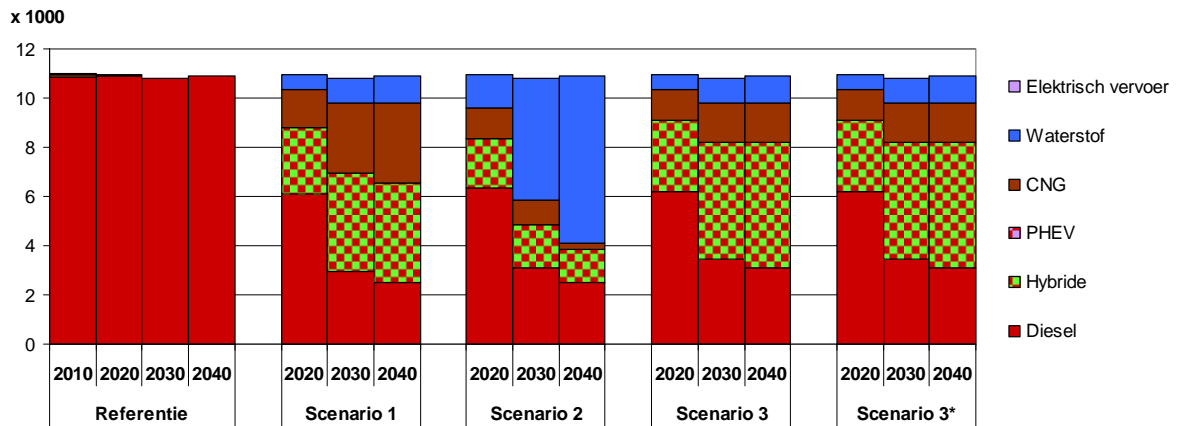
Het bovenstaande scenario is gebruikt in deze studie. Om ook een beeld te geven van wat er gebeurt als niet het volledig elektrisch vervoer, maar de plug-in hybride de dominante technologie wordt, is een alternatief beeld voor dit scenario ontwikkeld: Scenario 3*. Reden hiervoor kan zijn dat de consument zijn flexibiliteit niet wil opgeven qua actie-radius, en de plug-in hybride duidelijk zijn voorkeur heeft ondanks de wat hogere kosten. Dit scenario heeft voor de overige technologieën dezelfde scenario context, alleen breekt elektrisch vervoer slechts beperkt door tot een aandeel van 10% in de verkeersprestatie van lichte voertuigen. De resterende voertuigen worden rond 2040 allemaal in hybride uitvoering verkocht met een zeer hoog aandeel plug-in hybride. Doordat plug-in hybrides deels ook op fossiele brandstoffen rijden, is het aandeel kilometers op elektriciteit binnen de lichte voertuigen iets lager dan in Scenario 3: rond de 35%.



Figuur 3.1 Ontwikkeling wagenpark: personenauto's



Figuur 3.2 Ontwikkeling wagenpark: bestelwagens

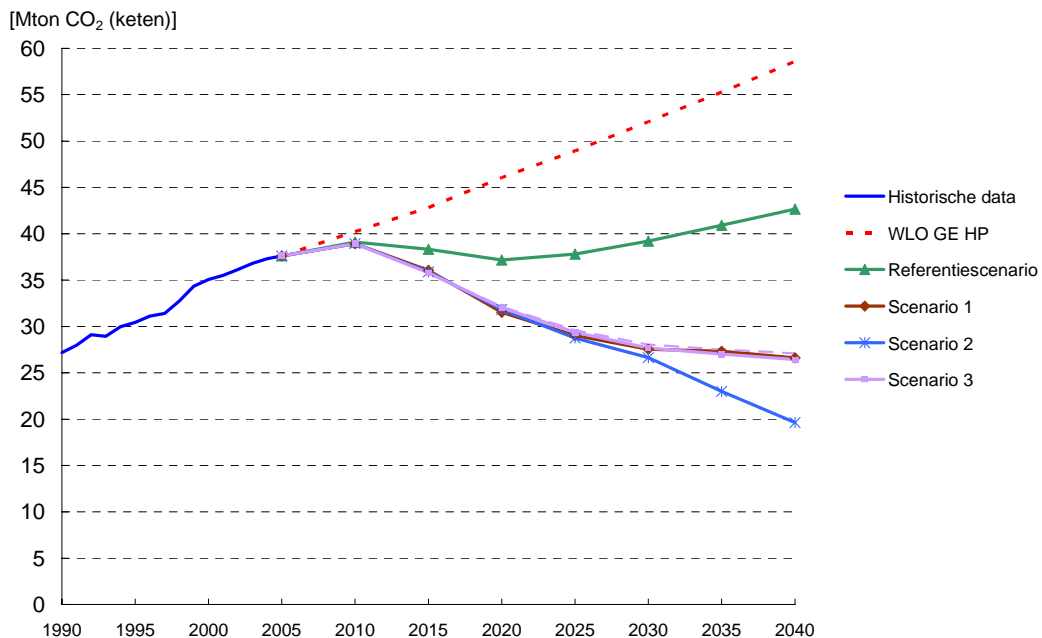


Figuur 3.3 Ontwikkeling wagenpark: Autobussen (inclusief touringcars)

3.2 Emissiereductie potentieel & kosteneffectiviteit

3.2.1 Emissiereductie potentieel

De CO₂-ketenemissies van het wegverkeer op basis van het Nederlandse verbruik zijn voor de verschillende scenario's weergegeven in Figuur 3.4. Rond 2025 wordt door alle innovatiescenario's het niveau van 1990 bereikt, waarna voor de meeste scenario's een verdere absolute daling van de emissies slechts beperkt mogelijk lijkt. Door de toenemende emissies in het referentiescenario vanwege de groeiende transportbehoefte, neemt de absolute reductie ten opzichte van dit scenario nog wel toe voor alle scenario's, zie ook Figuur 3.5.



Figuur 3.4 CO₂-ketenemissie wegverkeer (NL methode)

Scenario 1 met voornamelijk hybridisering en alternatieve brandstoffen, behaalt een even grote reductie als de beide varianten van Scenario 3 met een doorbraak van elektrisch vervoer. In de

periode tussen 2020 en 2030 verdubbelt de relatieve reductie ten opzichte van het referentiescenario van 15% naar 30% voor deze scenario's om rond de 40% te eindigen in 2040.

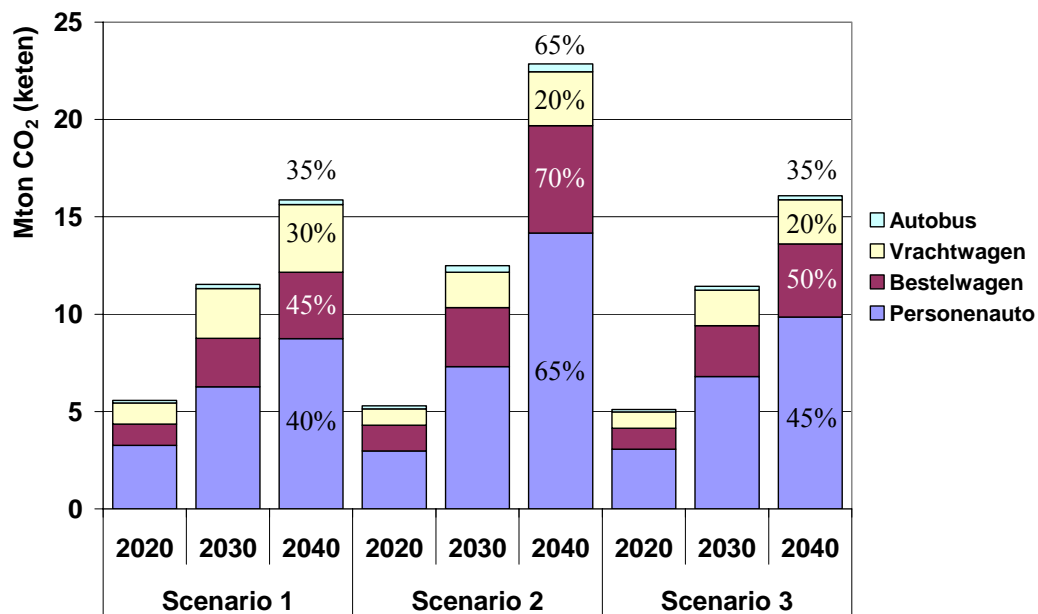
Scenario 2, waarin waterstof doorbreekt, is het scenario met het grootste lange-termijn reductiepotentieel. Tot 2030 is de emissiereductie vergelijkbaar met de overige scenario's, maar in 2040 neemt dit scenario duidelijk afstand van de overige scenario's met een relatieve reductie van 55% ten opzichte van het referentiescenario. De voornaamste reden hiervoor is dat waterstof op termijn een veel hoger marktaandeel heeft in het lichte voertuigenpark. Een andere reden is de zeer gunstige emissiefactor per kilometer vergeleken met de andere brandstoffen in combinatie met de zeer efficiënte brandstofcelauto.

Bij de bespreking van de transitiepaden waterstof en elektrisch vervoer zal aangegeven worden hoe dit emissiereductie potentieel wijzigt in geval van andere productieroutes voor de benodigde waterstof en elektriciteit. De aannames met betrekking tot deze productieroute hebben veel impact op het reductiepotentieel en voorzichtigheid is geboden bij het trekken van conclusies over de aantrekkelijkheid van waterstof en elektrisch vervoer. Zie Paragraaf 5.2 en 6.2 voor details.

Overigens dient opgemerkt te worden dat het referentiescenario slechts voorgenomen beleid tot 2020 bevat, en dat nog te ontwikkelen beleid niet meegenomen is. Ook zijn technologische ontwikkelingen van de interne verbrandingsmotor die niet noodzakelijk zijn voor het behalen van reeds gestelde CO₂-normen, niet meegenomen in het achtergrondscenario. Afhankelijk van het soort beleid en de voortgang op technologisch gebied, zullen de emissies van de innovatiescenario's dan ook deels meedalen (bv. in geval van 'volume-reductie beleid' of absolute toename van biobrandstoffen) of stabiel blijven (bv. als technologieën worden gestimuleerd die al in de innovatiescenario's aanwezig zijn). Dit zal waarschijnlijk weinig impact hebben op de onderlinge verschillen tussen de scenario's, maar kan het absolute reductiepotentieel en de gerelateerde kosteneffectiviteit beïnvloeden.

In de voorgaande studie was reeds geconcludeerd dat het behalen van sterkere reducties door de verschillende innovatiepakketten te combineren, onrealistisch lijkt. Er zouden dan nog hogere eisen gesteld worden aan de beschikbaarheid van biomassa grondstoffen, de infrastructuur voor de diverse alternatieve brandstoffen (CNG, biobrandstoffen, waterstof en elektriciteit), het R&D-succes en de business case van de diverse technologieën en de betaalbaarheid van de alternatieve brandstoffen. De transitiepaden elektrisch vervoer en waterstof sluiten elkaar overigens niet uit. Wel kan er sprake zijn van versnipperde financiering, waardoor uiteindelijk beide pas erg langzaam gerealiseerd worden, en waterstof wellicht helemaal niet. Op lange termijn zijn ook combinaties mogelijk. Te denken valt aan het doorontwikkelen van de plug-in hybride, met het vervangen van de verbrandingsmotor door een brandstofcel, die de accu oplaadt, zoals bijvoorbeeld verwacht wordt door het California ZEV panel (Kalhammer et al., 2007). Afhankelijk van kosten en performance ontwikkeling zal er een verdeling ontstaan tussen de brandstofcelauto, de elektrische auto, en de plug-in hybride.

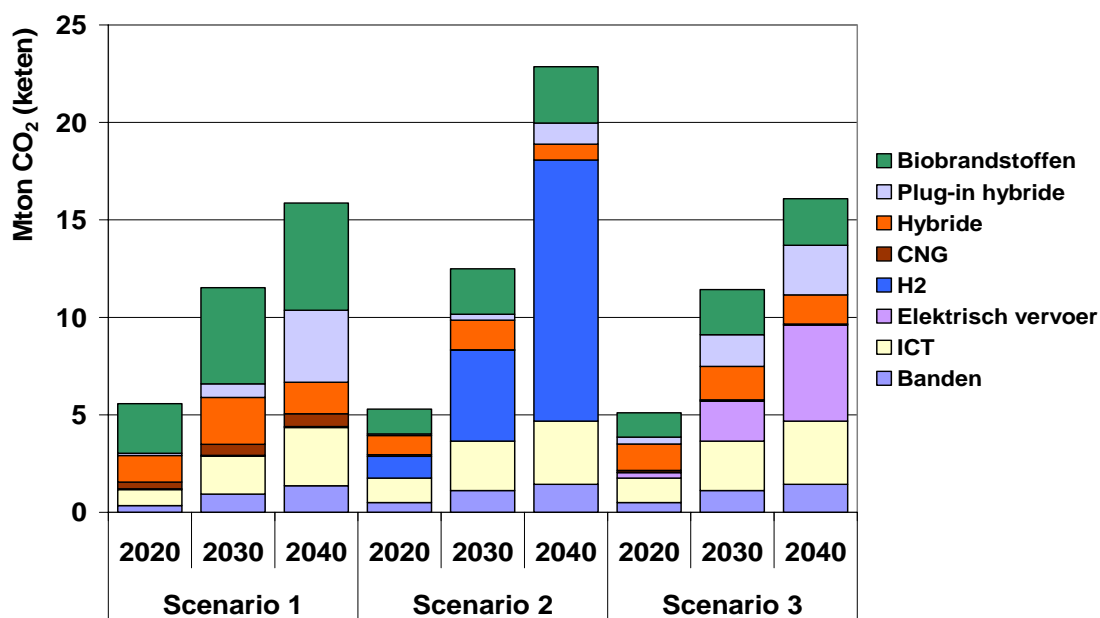
Wel zouden de gehanteerde scenario's tegen een achtergrond van Schoon en Zuinig Hoog tot lagere emissieniveaus kunnen leiden, vooral op de korte termijn (2020). De redenen zijn een versnelde invoering van de CO₂-normering voor zowel personenauto's als bestelwagens. Ook veronderstelt Schoon en Zuinig Hoog een biobrandstoffen aandeel van 20% in 2020, vergelijkbaar met Scenario 1, een stijging van 5% ten opzichte van het aandeel in Scenario's 2 en 3.



Figuur 3.5 Absoluut en relatief reductiepotentieel CO₂-ketenemissies per voertuigtype

Figuur 3.5 toont de absolute reductie ten opzichte van het referentiescenario van de drie innovatiescenario's. Voor het jaar 2040 is ook de relatieve reductie per segment gegeven. Het alternatieve Scenario 3* is vrijwel gelijk aan Scenario 3 en is niet getoond. In Scenario 1 is 75% van de totale reductie behaald bij de lichte voertuigen. Bij Scenario 2 en 3 is dit aandeel zelfs hoger, groeiend van 80% in 2020 tot ruim 85% in 2040. De verklaring van dit verschil is het hogere aandeel biobrandstoffen in Scenario 1, dat over alle modaliteiten doorwerkt, in tegenstelling tot waterstof en elektrisch vervoer die in Scenario 2 en 3 vooral reducties opleveren bij personenauto's en bestelwagens.

Het relatieve reductiepotentieel per voertuigtype is in Figuur 3.5 alleen voor 2040 weergegeven door middel van percentages. Voor 2040 worden in alle scenario's de hoogste emissiereducties ook in relatieve zin bij de lichte voertuigen gerealiseerd. Zo worden in Scenario 2 emissiereducties van 65% tot 70% behaald voor personenauto's en bestelwagens (beiden uitgedrukt ten opzichte van de ketenemissies in het referentiescenario). Gezien de voorspelde toekomstige groei van het vrachtverkeer, is het verontrustend te zien dat in de huidige scenario's hier slechts een beperkte relatieve reductie mogelijk is. Er zijn voor deze sector diverse mogelijkheden om tot verregaande reducties te komen in het vrachtvervoer (Passier, 2008a), maar deze vallen niet onder de in deze studie beschouwde technologieën.



Figuur 3.6 *Reductiepotentieel CO₂-ketenemissies wegverkeer per optie (NL methode)*

Figuur 3.6 geeft een alternatieve opsplitsing van de totale emissiereductie naar besparingsoptie. Hier is duidelijk te zien dat, ondanks dat de scenario's qua totale emissiereductie elkaar tot 2030 nauwelijks ontlopen, er toch grote verschillen zitten in de opbouw van de reductie.

Het belang van energiebesparende opties die in alle modaliteiten tot besparingen kunnen leiden, zoals Banden en ICT, is erg groot. Deze twee opties leveren samen voor alle scenario's, afhankelijk van het zichtjaar 20% tot 35% van de totale reductie op. Verder valt de te verwachten grotere besparing van biobrandstoffen in Scenario 1 op. De bescheiden bijdrage van waterstof en elektrisch vervoer in 2020 is te wijten aan de langzame en wat later op gang komende penetratie van deze technologieën. Wel neemt de reductie voor die technologieën sterk toe na 2020 en groeit uit tot de optie met het grootste reductiepotentieel voor het betreffende scenario.

In algemene zin valt het belang op van het hebben van een gevarieerde mix van besparingsopties. Alleen Scenario 2 zou met één enkele optie in 2040 een substantiële reductie kunnen behalen, maar zonder de andere opties zou tot 2040 het reductiepotentieel van dit scenario zeer beperkt zijn. Bij de andere opties is dit nog sterker het geval. Het inzetten op diverse verschillende opties is in ieder geval verstandig voor het geval dat een bepaalde technologie op termijn toch niet haalbaar lijkt (technologisch of economisch). Dit laatste zal overigens afhangen van internationale ontwikkelingen en veelal Europees beleid

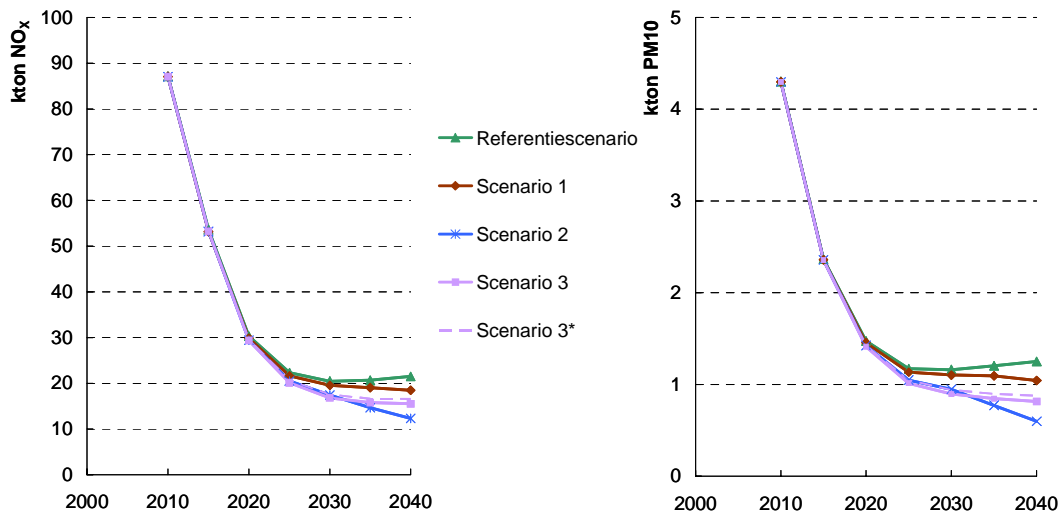
Opties die het energieverbruik verminderen zoals hybrides, banden met lage rolweerstand en ICT, verlagen naast de emissies ook de brandstofbehoefte met een positief effect op de kosten voor en de afhankelijkheid van dure fossiele (en alternatieve) brandstoffen. Zolang stimulering van deze opties niet ten koste gaat van de grote benodigde transitie zijn dit zeer robuuste opties om tot emissiereductie te komen.

Bovenstaande analyses hebben allemaal betrekking op de CO₂-ketenemissies op basis van het Nederlandse brandstofverbruik. Bijlage C bevat vergelijkbare resultaten met betrekking tot de CO₂-ketenemissies conform de IPCC-methode Daarnaast wordt ook inzicht gegeven in de directe CO₂-emissies op basis van het Nederlandse brandstofverbruik.

Overige emissies: NO_x en PM_{10}

Voor de scenario's zijn tevens de directe overige emissies bepaald voor NO_x en fijnstof (PM_{10}), zie ook Figuur 3.7. Zie Bijlage B voor de onderliggende uitgangspunten. In tegenstelling tot CO_2 -emissies wordt hier niet naar de overige emissies in de productie keten gekeken, omdat overige emissies vooral een probleem betreft op lokaal niveau (direct langs wegen).

De innovatiescenario's kunnen in 2040 de resterende overige emissies met 20% tot 50% reduceren ten opzichte van het referentiescenario, afhankelijk van het scenario. Deze reductie is relatief groot, maar valt weg in vergelijking met de enorme reductie die al plaats heeft gevonden tussen 2010 en 2025 als gevolg van de verscherpte Euro-normen. Hierdoor zijn de overige emissies in 2040 al 70% tot 75% lager dan in 2010, en zal het grootste probleem rond deze emissies al opgelost zijn en niet afhankelijk zijn van innovatie in het wegverkeer.



Figuur 3.7 Directe overige emissies wegverkeer: NO_x (links) en PM_{10} (rechts)

De reducties door de innovatiescenario's kunnen met behulp van de in Paragraaf 2.1 gegeven factoren worden gemonetariseerd om een inschatting van de externe kosten te krijgen die kunnen worden uitgespaard. Voor NO_x en PM_{10} resulteert dit in een jaarlijkse besparing van € 10-40 miljoen en € 20-60 miljoen respectievelijk. Vergeleken met de jaarlijkse meerkosten van de innovatiescenario's van ruim € 1,5 miljard, zie Paragraaf 3.2.3, zijn deze besparingen marginaal.

3.2.2 Emissiereductie potentieel - gevoeligheidsanalyse verdieseling

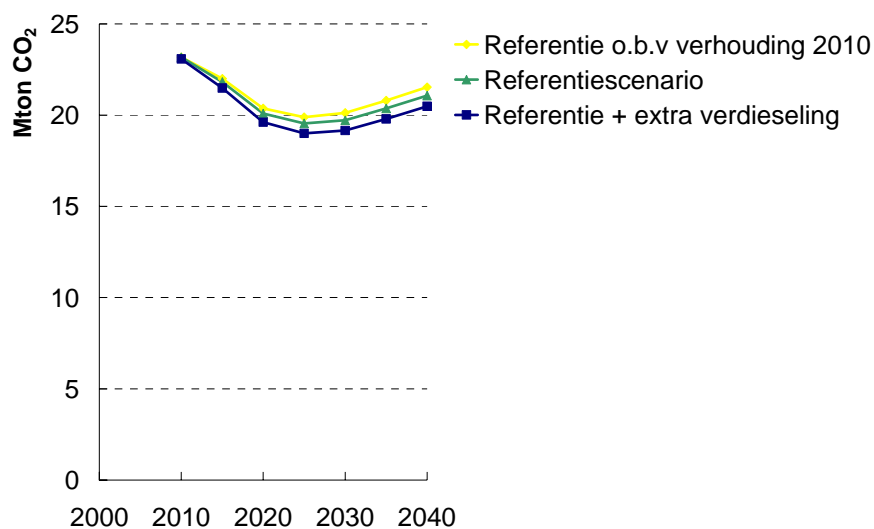
Tot nu toe is in Nederland het gebruik van diesel personenwagens ontmoedigd vanuit het oogpunt van de lokale luchtkwaliteit¹³. Door de steeds verder aangescherpte Euro-normen verwacht men dit beleid over een aantal jaar niet meer nodig te hebben. In het referentiescenario wordt al een groeiend aandeel diesel voertuigen verondersteld binnen de personenauto's, ten koste van benzine voertuigen. Het aandeel in het personenauto wagenpark stijgt van 23% in 2010 tot 40% in 2040. Dit komt overeen met een stijgend aandeel van dieselveertuigen in de vervoersprestatie van personenauto's van 40% in 2010 naar bijna 60% in 2040.

Indien innovatie niet van de grond komt in Nederland en Europa, is er voor Nederland nog altijd de optie om de 'verdieseling' sterker door te voeren totdat het aandeel van dieselveertuigen on-

¹³ Nederland heeft een relatief laag aandeel van diesel voertuigen in het personenwagenpark. De accijns op diesel is lager dan de accijns op benzine, maar door de hogere BPM en wegenbelasting is rijden op diesel voor personenauto's pas interessant bij hoge jaarkilometrages.

geveer gelijk is aan omringende landen: 70%. Hiertoe moet, bovenop de reeds veronderstelde verdieseling in het referentiescenario, de helft van de geplande nieuwe benzine voertuigen vervangen worden door nieuwe diesel voertuigen. Verwacht is dat dit mogelijk is per 2020 (40% al in 2015). Voor de overstappende personen is wel aangenomen dat zij hun gemiddelde rijkeigenschappen behouden (transportbehoefte per wegtype), en het gemiddelde aantal kilometers dat per dieselvoertuig wordt gereden zal hierdoor aanzienlijk dalen. Het aandeel van dieselvoertuigen in de vervoersprestatie van personenauto's zal stijgen tot bijna 80% in 2040.

Bij vergelijkbare automodellen zal de overstap van een benzine naar een diesel voertuig door de hogere efficiëntie van de diesel ICE tot een emissiereductie leiden. Momenteel is het verschil in efficiëntie tussen een benzine en een diesel voertuig relatief groot door de recente verbeteringen aan de diesel ICE. Voor de toekomst wordt verwacht dat dit verschil wat kleiner zal worden als gevolg van het hogere verbeterpotentieel bij de benzine ICE, zie Bijlage B.1.2 voor de gebruikte uitgangspunten.



Figuur 3.8 *CO₂-ketenemissies met en zonder verdieseling ten opzichte van referentiescenario*

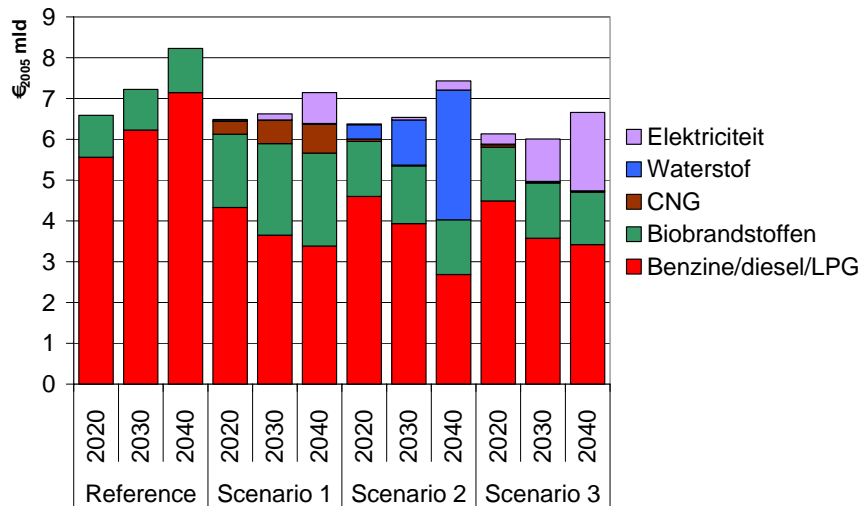
Figuur 3.8 toont de emissiereductie van een verdergaande verdieseling op basis van deze uitgangspunten. De ketenemissies zijn rond de 0,5 Mton lager ten opzichte van het referentiescenario, wat overeenkomt met een reductie van bijna 3% van de ketenemissies van het personenauto's.

Dit is echter een onderschatting van het reductiepotentieel van verdieseling omdat een deel van de reductie die aan verdieseling kan worden toegerekend al in het achtergrondscenario plaatsvindt. Als dit deel ook toegerekend wordt aan de 'optie' verdieseling, is het reductiepotentieel 1,1 Mton in 2040, gelijk aan 5% van de totale ketenemissies van personenauto's. Concluderend kan gesteld worden dat een verregeaande verdieseling van het Nederlandse personenautopark slechts een beperkte CO₂-emissiereductie oplevert.

3.2.3 Kosteneffectiviteit

Om de kosteneffectiviteit te bepalen is gekeken naar de ontwikkeling van de twee belangrijkste kostencomponenten: de brandstofkosten en de kosten voor het wagenpark. Zie Bijlage B voor de gebruikte uitgangspunten. Het betreft hier de kosten vanuit het nationale kostenperspectief, dus exclusief overdrachten tussen de verschillende actoren en de overheid (zoals belastingen, heffingen en subsidies).

Figuur 3.9 toont de jaarlijkse brandstofkosten voor het referentiescenario en de innovatiescenario's. De innovatiescenario's hebben na 2030 substantieel lagere brandstofkosten, oplopend tot 10% tot 20% besparing in 2040 (€ 0,8 mld. tot € 1,6 mld.).



Figuur 3.9 Jaarlijkse brandstofkosten wegverkeer

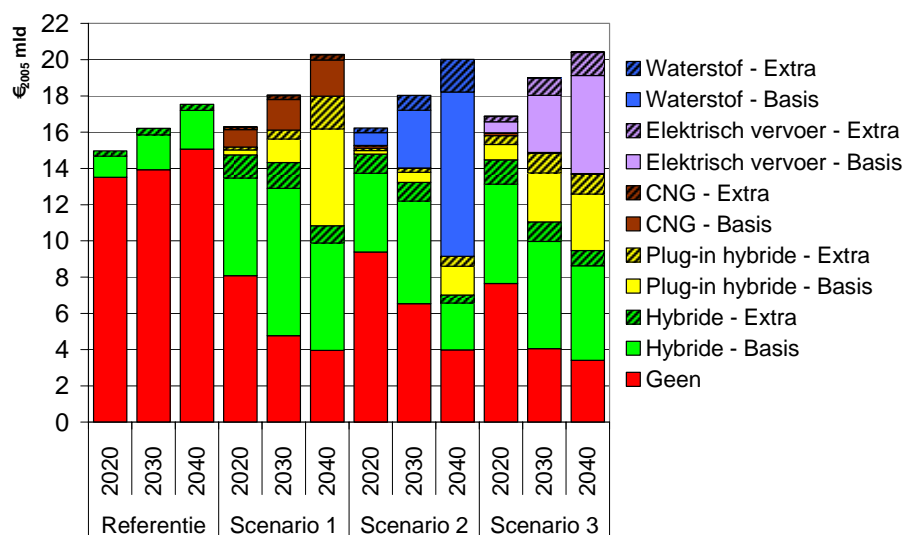
De voornaamste reden is de hogere voertuigefficiëntie als gevolg van de verregaande penetratie van energiebesparende innovatieve technologieën zoals zuinige banden, ICT en (plug-in) hybrides. Maar een deel is ook verklaard door de opkomst van elektriciteit en waterstof als brandstof. Tabel 3.1 toont de brandstofkosten per 100 km van de diverse brandstoffen voor personenauto's. Elektrisch vervoer heeft al vanaf de introductie een brandstofkostenvoordeel ten opzichte van conventionele brandstoffen (per km) in het referentiescenario (benzine en diesel inclusief bijmenging biobrandstoffen en aandeel hybrides). Waterstof is initieel wel duurder dan conventionele brandstoffen (per km). In de kosten van waterstof is wel een opslag meegenomen ten behoeve van de ontwikkeling van de nieuwe infrastructuur. Als gevolg van de voorziene daling in de kosten van waterstof, is vanaf 2030 rijden op waterstof per kilometer al goedkoper dan op conventionele brandstoffen in het referentiescenario (inclusief bijmenging). Na 2030 nemen de relatieve kosten niet meer substantieel af, en zijn voornamelijk nog wat prijseffecten zichtbaar.

Tabel 3.1 Brandstofkosten personenwagens per 100 km en de relatieve verkeersprestatie

| Brandstofkosten [€ ₂₀₀₅ /100 km] | 2020 | | | | | 2030 | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|
| | Referentie | Scen. 1 | Scen. 2 | Scen. 3 | Referentie | Scen. 1 | Scen. 2 | Scen. 3 | | | | | | | | |
| | [€] | [%] | [%] | [%] | [€] | [%] | [%] | [%] | | | | | | | | |
| Benzine | 2,87 | 43 | 2,66 | 35 | 2,67 | 38 | 2,63 | 37 | 2,74 | 38 | 2,26 | 24 | 2,30 | 25 | 2,20 | 19 |
| Bioethanol | 4,97 | 5 | 4,60 | 9 | 4,63 | 7 | 4,56 | 6 | 4,11 | 4 | 3,38 | 10 | 3,45 | 6 | 3,29 | 6 |
| Diesel | 2,53 | 46 | 2,29 | 38 | 2,30 | 42 | 2,24 | 41 | 2,53 | 50 | 2,06 | 34 | 2,10 | 36 | 1,99 | 34 |
| Biodiesel | 4,21 | 5 | 3,82 | 10 | 3,83 | 7 | 3,73 | 7 | 3,66 | 6 | 2,99 | 15 | 3,05 | 9 | 2,88 | 9 |
| LPG | 3,16 | 2 | 3,09 | 2 | 3,05 | 2 | 3,04 | 2 | 2,98 | 1 | 2,74 | 1 | 2,67 | 1 | 2,67 | 1 |
| H ₂ | 0 | 0 | 0 | 3,76 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,74 | 20 | 0 | 0 | 0 |
| CNG | 0 | 2,82 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,65 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Elektriciteit | 0 | 2,15 | 1 | 2,10 | 1 | 2,09 | 7 | 0 | 1,90 | 6 | 1,86 | 3 | 1,85 | 30 | 0 | 0 |
| Totaal | 2,89 | 100 | 2,81 | 100 | 2,78 | 100 | 2,64 | 100 | 2,75 | 100 | 2,44 | 100 | 2,45 | 100 | 2,16 | 100 |

Figuur 3.10 laat voor de innovatieve technologieën de jaarlijkse kosten van het wagenpark zien, wederom vanuit een nationaal kostenperspectief, zie Bijlage B voor de gehanteerde uitgangspunten. De extra kosten zijn apart gearceerd getoond, waardoor de relatieve meerkosten van een bepaalde technologie ten opzichte van een conventioneel voertuig ook inzichtelijk zijn. De kosten als gevolg van de penetratie van ICT zijn meegenomen in de gepresenteerde meerkosten van de overige technologieën. De innovatiescenario's resulteren in een stijging van de jaarlijkse kos-

ten van het wagenpark van ongeveer 10% in 2020 tot ruim 15% in 2040. Let op dat een deel van het wagenpark dat geen innovaties ondergaat op lange termijn vooral bestaat uit vrachtvervoer en touringcars met als resultaat dat bijna een kwart van de wagenparkkosten in 2040 niet verandert ten opzichte van de referentie. Het verschil tussen de drie innovatiescenario's onderling valt overigens binnen de onzekerheidsmarges rondom de meerkosten voor de diverse technologieën.



Figuur 3.10 Jaarlijkse kosten wagenpark

De bovenstaande kosten leveren gecombineerd met de hoeveelheid vermeden CO₂-ketenemissies een kosteneffectiviteit per scenario. Tabel 3.2 laat zien dat de kosteneffectiviteiten van de diverse innovatiescenario's elkaar niet veel ontlopen, en dat ze op termijn allemaal naar rond de € 100 per ton vermeden CO₂ (keten) gaan.

Tabel 3.2 Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies

| | Scenario 1 | | | Scenario 2 | | | Scenario 3 | | |
|--|------------|---------|---------|------------|---------|--------|------------|---------|--------|
| | 2020 | 2030 | 2040 | 2020 | 2030 | 2040 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Δ CO2 ketenemissie (Mton) | 5,6 | 11,6 | 16,0 | 5,3 | 12,6 | 22,9 | 5,1 | 11,5 | 16,2 |
| Δ Brandstofkosten (€ mld) | -0,1 | -0,6 | -1,1 | -0,2 | -0,7 | -0,8 | -0,5 | -1,2 | -1,6 |
| Δ Meerkosten Wagenpark (€ mld) | 1,4 | 1,9 | 2,8 | 1,3 | 1,9 | 2,6 | 2,0 | 2,9 | 3,0 |
| Δ Kosten - Totaal (€ mld) | 1,3 | 1,3 | 1,8 | 1,1 | 1,2 | 1,8 | 1,5 | 1,6 | 1,4 |
| Kosten-effectiviteit (€/ ton CO ₂) | 200-300 | 100-125 | 100-125 | 200-300 | 100-125 | 75-100 | 200-300 | 125-150 | 75-100 |

3.2.4 Gevoeligheidsanalyse kosteneffectiviteit - hoge fossiele brandstofprijzen

Er is ook een gevoeligheidsanalyse met hogere brandstofprijzen uitgewerkt. Hierbij zijn de prijzen van ruwe olie en aardgas verhoogd met 50%. Dit werkt het sterkst door bij waterstof als dit uit aardgas geproduceerd wordt. Ook benzine, diesel en LPG worden vrijwel evenredig duurder. Omdat de prijs van biobrandstoffen slechts voor een beperkt deel aan fossiele brandstof gekoppeld is (kunstmest, transport, hulpstoffen, energieverbruik van de biobrandstof fabrieken) is de doorwerking hier aanzienlijk minder. Per saldo komen de prijzen van fossiel en biobrandstoffen hierdoor dicht bij elkaar te liggen (rekening houdend met de onzekerheden is er zelfs gedeeltelijke overlap). Hierbij is verondersteld dat de hogere fossielprijzen geen effect hebben op de bio-grondstofprijzen. Ook zijn er geen veronderstellingen gedaan over een CO₂-prijs die de marktprijs van biobrandstoffen ten opzichte van fossiel brandstoffen kan verhogen. De resulterende brandstofprijzen staan in Bijlage A en zijn gebruikt om de kosteneffectiviteit bij extra hoge fossiele brandstofprijzen te bepalen. Tabel 3.3 toont dat in deze situatie de kosteneffectiviteit al in 2030 onder de € 100 per vermeden ton CO₂ duikt, om in 2040 onder of rond de € 50 per ton uit te komen. De uitgangspunten voor deze analyse zijn uitvoerig beschreven in de voor-

gaande studie (Uyterlinde et al., 2008). Een belangrijk uitgangspunt is dat alleen de brandstofkosten zijn aangepast, en er geen wijzigingen in de verkeersprestatie of penetratie van energiebesparende opties zijn verondersteld als gevolg van de gestegen kosten.

Tabel 3.3 *Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - impact extra hoge fossiele brandstofprijzen*

| | Scenario 1 | | | Scenario 2 | | | Scenario 3 | | |
|--|------------|-------|-------|------------|-------|------|------------|--------|------|
| | 2020 | 2030 | 2040 | 2020 | 2030 | 2040 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Δ CO ₂ ketenemissie (Mton) | 5,6 | 11,6 | 16,0 | 5,3 | 12,6 | 22,9 | 5,1 | 11,5 | 16,2 |
| Δ Brandstofkosten (€ mld) | -0,4 | -1,2 | -2,0 | -0,4 | -1,1 | -1,4 | -0,7 | -2,0 | -2,6 |
| Δ Meerkosten Wagenpark (€ mld) | 1,4 | 1,9 | 2,8 | 1,3 | 1,9 | 2,6 | 2,0 | 2,9 | 3,0 |
| Δ Kosten - Totaal (€ mld) | 1,0 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 1,1 | 1,2 | 0,9 | 0,4 |
| Kosten-effectiviteit (€/ ton CO ₂) | 150-200 | 50-75 | 50-75 | 150-200 | 50-75 | <50 | 200-300 | 75-100 | <50 |

4. Transitiepad biobrandstoffen

4.1 Ontwikkelingsperspectief

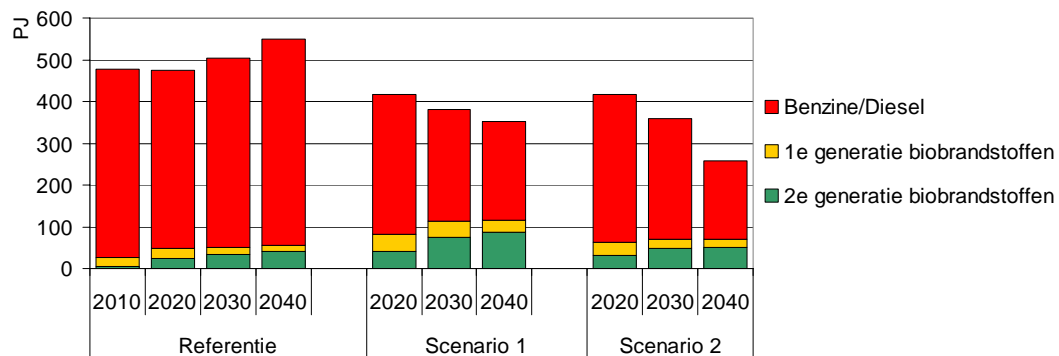
Biobrandstoffen vormen de enige optie voor brandstofsubstitutie waarbij nauwelijks veranderingen in de infrastructuur van brandstof distributie en voertuigtechnologie nodig zijn¹⁴. Zoals met alle opties die gebaseerd zijn op biomassa is de CO₂ die vrijkomt bij verbranding van biobrandstoffen kort daarvoor opgeslagen in organisch materiaal. Momenteel staan biobrandstoffen centraal in een intensief wetenschappelijk en maatschappelijk debat. De belangrijkste onderwerpen van discussie zijn:

- De netto energiebalans en broeikasgasemissie van de leveringsketen van biomassa. In alle stappen van de biomassaproductieketen zijn inputs nodig die leiden tot broeikasgasemissies. Er bestaan grote verschillen in emissies tussen verschillende biobrandstofketens, waarbij het verbouwen van gewassen de essentiële kritieke stap vormt. Met name N₂O-emissies door de toepassing van kunstmest vormen een kritische maar vooralsnog onzekere factor (Crutzen et al., 2008). Bovendien zijn er methodologische verschillen, bijvoorbeeld in de wijze waarop emissies worden toegerekend tussen hoofd- en bijproduct van een gewas. Dit leidt tot een breed scala aan schattingen van broeikasgasemissies. Een van de meest uitgebreide ramingen die momenteel beschikbaar is betreft de CONCAWE/EUCAR/JRC-studie (Edwards et al., 2006). De broeikasgasemissies in deze studie zijn hierop gebaseerd.
- Naast de emissies in de productieketen kunnen biobrandstoffen uit landbouwgewassen ook leiden tot broeikasgasemissies veroorzaakt door veranderingen in het koolstofgehalte van de grond als het gevolg van veranderingen in het landgebruik. Dit kan direct optreden in het veld waar het gewas wordt geteeld, maar ook op indirecte wijze. Bijvoorbeeld: Mais dat in Amerika wordt geteeld voor ethanolproductie op land waar voorheen graan werd geteeld voor voedselproductie kan ertoe leiden dat er nu elders in de wereld op nieuwe locaties graan wordt geteeld om aan de voedselvraag te blijven voldoen. Hierdoor wordt bijvoorbeeld bosgrond omgezet in landbouwgrond, wat leidt tot verlies van biodiversiteit en koolstof in de grond. Een bekende analyse van dit effect betreft de studie van Searchinger et al., 2008. De mate waarin dit effect optreedt, hangt echter af van een veelvoud van onzekere relaties (zie ook Sylvester-Bradley, 2008). Een van de meest kritieke factoren is de vraag of landbouwers reageren op de toenemende vraag naar landbouwgewassen door meer land in te zetten voor productie (wat leidt tot meer broeikasgasemissies) of door het uitbreiden van de productiviteit van bestaande landbouwgrond (wat leidt tot veel minder broeikasgasemissies). Bovendien maakt het een groot verschil wat het organisch stofgehalte is van het land dat wordt omgevormd tot landbouwgrond: een bos op veengronden geeft veel hogere emissies dan een extensief grasland.
- Samenhangend hiermee speelt de ‘food-fuel’ discussie: conventionele biobrandstoffen gebruiken voedselgewassen als grondstof. Hoewel de vraag hiernaar nog relatief beperkt is in vergelijking met de vraag naar gewassen voor voedsel en voeder (Bole and Londo, 2008), is men bezorgd dat ontwikkelingen in biobrandstoffen zullen leiden tot stijgende voedselprijzen en armoede, met name in stedelijke gebieden (Gallagher et al., 2008; Oxfam, 2008). Vooral in ontwikkelingslanden brengt de productie van biobrandstoffen zowel kansen als risico’s met zich mee in termen van economische ontwikkeling, milieu en welzijn. Een cruciale factor lijkt de betrouwbaarheid van eigendoms- en gebruiksrechten van land door lokale boeren (Cotula et al., 2008), iets waarmee het in verscheidene ontwikkelingslanden bijzonder slecht gesteld is.
- Een alternatief voor de huidige generatie biobrandstoffen is de tweede generatie die momenteel in ontwikkeling is. Omdat deze brandstoffen voornamelijk gebruik maken van laagwaardige materialen als grondstof (reststromen uit de bosbouw en houtverwerking, stro en andere agrarische restproducten) is er veel minder sprake van concurrentie tussen food en fu-

¹⁴ In dit hoofdstuk worden uitsluitend de vloeibare biobrandstoffen behandeld. Biobrandstoffen in gasvorm vergen wel degelijk infrastructurele aanpassingen.

el, en is het risico op indirect verlies van biodiversiteit en bodemkoolstof ook kleiner¹⁵. Bovendien is de gemiddelde broeikasgasemissiereductie beduidend beter dan dat van de huidige eerste generatie biobrandstoffen (Edwards et al., 2006). De complexe technologie waarmee deze materialen worden omgezet in vloeibare brandstoffen is echter nog in ontwikkeling en zal naar verwachting tussen 2010 en 2015 op enige schaal worden geïntroduceerd (IEA, 2008). Daarnaast kunnen de aanvankelijk hoge kosten, investeringsrisico's en de relatief lange introductietijd een snelle doorbraak van deze opties tegenwerken. Nederland bevindt zich echter wel in een relatief gunstige positie ten aanzien van deze biobrandstoffen met de aanwezigheid van een grootschalige haven en olieraffinage-infrastructuur in het Rotterdamse havengebied en een nationaal oliebedrijf dat sterk betrokken is bij de ontwikkeling van 2^e generatie biobrandstoffen.

De EU bereidt op dit moment een renewables richtlijn voor waarin een bindende doelstelling wordt voorgesteld ten aanzien van biobrandstoffen. In alle lidstaten moet in 2020 minimaal 10% van alle benzine- en dieserverkoop vervangen zijn door biobrandstoffen¹⁶ (EC, 2008). Om te voorkomen dat deze doelstelling leidt tot de hierboven beschreven negatieve effecten worden extra criteria overwogen, bijvoorbeeld ten aanzien van broeikasgasemissies in de productieketen en directe veranderingen in landgebruik. In enkele andere lidstaten worden certificeringprogramma's ontwikkeld voor duurzame biobrandstoffen met een soortgelijke insteek. Een aantal problemen rond de implementatie van certificering is echter nog onopgelost, bijvoorbeeld met betrekking tot methodologie, dataverzameling en accountability. Daarnaast heeft de EU enkele programma's opgestart die specifiek gericht zijn op het versterken van de landbouwsector in regio's waar biobrandstoffen naar verwachting geproduceerd zullen gaan worden. Alles welbeschouwd is het nog verre van zeker dat deze maatregelen negatieve effecten van biobrandstoffen volledig kunnen ondervangen.



Figuur 4.1 *Energiegebruik: aandeel biobrandstoffen en benzine/diesel*

Figuur 4.1 toont de verwachte groei van biobrandstoffen in de tijd voor de verschillende scenario's, gebaseerd op de huidige status van het debat en de volgende toekomstverwachtingen:

- In het baselinescenario wordt de EU-biobrandstoffenrichtlijn geïmplementeerd en behaalt Nederland de 10% doelstelling voor 2020. Deze 10% blijft constant in de daaropvolgende decennia, met een lichte groei in absolute termen. Dit wordt gehaald door het mengen van biobrandstoffen zonder aanpassing van bestaande of nieuwe voertuigen. Het leeuwendeel zal

¹⁵ Versterkte afvoer van bosbouwresiduen kan wel leiden tot vermindering van de biodiversiteit in productiebossen. Dit effect is echter van beduidend mindere orde dan dat van bijvoorbeeld ontbossing, en nieuwe bosaanleg op landbouwgrond leidt over het algemeen tot verbetering van de biodiversiteit. Bovendien voorkomt de concept-EU-richtlijn hernieuwbare energie het gebruik van hout uit volledig natuurlijke bossen (EC, 2008).

¹⁶ In de definitieve versie van de richtlijn hernieuwbare energie, aangenomen in het Europees Parlement op 17 december 2008 (EP, 2008), geldt deze 10%-verplichting voor alle vormen van hernieuwbare energie in transport, ook bijvoorbeeld hernieuwbare waterstof en elektriciteit (in plug-in hybrides of all-electric voertuigen). Omdat naar verwachting de aandelen van deze bronnen in 2020 nog beperkt zullen zijn, is in deze rapportage verder uitgegaan van een 10%-verplichting voor biobrandstoffen.

- geïmporteerd worden, hetzij als basismateriaal (bijv. koolzaadolie) of als biobrandstof (bijv. ethanol uit Brazilië).
- Voor wat betreft de verhouding 1^e versus 2^e generatie biobrandstoffen nemen we aan dat strikte maatregelen geïmplementeerd zullen worden vanwege de volgende redenen:
 - Nederland zal voor het grootste deel van de grondstoffen benodigd voor de biobrandstoffen afhankelijk zijn van import. Omdat de negatieve invloed van duurzaamheid, het voedsel-brandstof vraagstuk en indirecte veranderingen van landgebruik veel minder optreedt bij de 2^e generatie zal een snelle introductie van deze opties op minder weerstand stuiten in het maatschappelijke debat over biobrandstoffen.
 - Omdat broeikasgasemissiereductie een van de belangrijkste drijfveren van biobrandstoffen is en de emissieprofielen van de 2^e generatie aanzienlijk beter zijn dan die van de 1^e generatie, vormen deze brandstoffen een beter antwoord op dit beleidsdoel. Daarom nemen we aan dat 50% van de totale biobrandstofconsumptie in Nederland in 2020 afkomstig zal zijn van 2^e generatie technologieën, een aandeel dat geleidelijk zal toenemen in de daaropvolgende decennia. Dit pad vereist echter ambitieus ondersteunend beleid voor deze opties, bijvoorbeeld in de vorm van R&D-ondersteuning, investeringssubsidies en prijsondersteuning.
 - Scenario 1 is een uitwerking voor biobrandstoffen met een hoger ambitieniveau. Dit is vanwege de volgende redenen:
 - De wens om emissies in transport sterker terug te dringen. Bij het uitblijven van een doorbraak van brandstofcellen of elektrische voertuigen vormen biobrandstoffen een van de weinige overige alternatieven.
 - De noodzaak om te voldoen aan de 14% doelstelling voor duurzaam in 2020, zoals vastgelegd in het voorstel voor de richtlijn voor duurzame energie. Om deze doelstelling te behalen is wellicht een groter aandeel biobrandstoffen nodig dan 10%.

Hier gaan we uit van een aandeel biobrandstoffen van 20% in 2020 (waarvan ca. 50% 2^e generatie¹⁷). Dit ambitieniveau heeft praktische consequenties:

 - Voor dieselsubstituten gaan we uit van een vermenging van conventionele biodiesel tot een maximum van 10% wat technisch mogelijk is voor de huidige voertuigenvloot. Voor het resterende aandeel dieselsubstituut wordt aangenomen dat dit 2^e generatie FT-diesel betreft, een superieure kwaliteit diesel die zonder technische problemen gemengd kan worden.
 - Voor ethanol (zowel 1^e als 2^e generatie productie) lijkt generieke bijmenging tot 20% technisch niet haalbaar. Daarom moet gelijktijdig met deze doelstelling de introductie van ‘flexi-fuel’ voertuigen en E85 pompstations plaatsvinden of een grootschalige introductie van biobrandstoffen (E85/95 of bijvoorbeeld biogas) in bussen en andere bedrijfswagenparken.
 - In Scenario 2 waarin de waterstof brandstofcelauto doorbreekt, kunnen biobrandstoffen nog steeds een relevante rol spelen, hoewel de absolute bijdrage van biobrandstoffen lager is dan in Scenario 1. Met het oog op de verwachte vraag naar biomassa voor duurzame productie van waterstof wordt, in absolute zin, een kleinere hoeveelheid biobrandstoffen verwacht. De relatieve aandelen in de totale benzine- en dieserverkoop kunnen door de algemene stijgende vraag naar vloeibare brandstoffen echter nog steeds niveaus bereiken waardoor maatregelen nodig zijn die de vereiste grotere aandelen ethanol mogelijk maken.
 - In beide scenario's nemen we aan dat de duurzaamheidsaspecten van biobrandstoffen op de volgende drie manieren worden geadresseerd:
 - Een sterke en snelle introductie van 2^e generatie biobrandstoffen.
 - Effectieve duurzaamheidsbescherming voor (de import van) biobrandstoffen en hun grondstoffen.
 - Voldoende maatregelen die landbouwproductiviteit op bestaande landbouwgrond in producerende regio's bevorderen met als doel indirecte veranderingen in landgebruik te voorkomen.

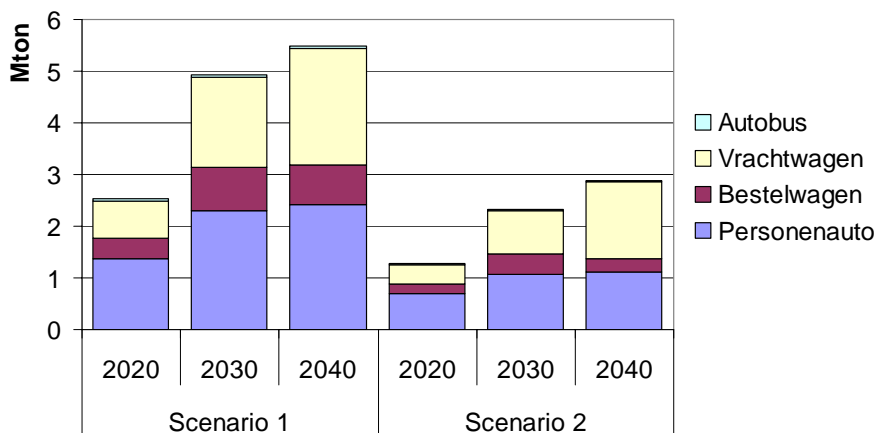
¹⁷ De aannames voor deze uitgangspunten zijn aan het begin van de studie vastgesteld. Een aandeel van 50% tweede generatie biobrandstoffen lijkt erg ambitieus, gegeven de recente discussies rond de duurzaamheid, food versus fuel, en het verslechterde investeringsklimaat door sterk fluctuerende olieprijs en de kredietcrisis.

Als aan deze voorwaarden wordt voldaan kunnen duurzaamheidsaspecten op een acceptabel niveau beschouwd worden en hoeft de invloed van indirecte veranderingen in landgebruik niet meegenomen te worden.

- Wat betreft kosten is de verwachting dat conventionele 1^e generatie biobrandstoffen structureel duurder zullen blijven dan fossiele brandstoffen. Ten aanzien van de 2^e generatie biobrandstoffen wordt verwacht dat de kloof tussen de kosten van biobrandstoffen en fossiele brandstoffen langzaam zal verminderen in de loop van de tijd, wat voornamelijk toe te schrijven valt aan technologische learning-by-doing.

4.2 Emissiereductie & kosteneffectiviteit

Het emissiereductie potentieel van biobrandstoffen is afhankelijk van de hoeveelheid biobrandstoffen, zie Figuur 4.1. In het referentiescenario betreft dit, in de periode 2020 tot 2040, een aandeel van 10% voor benzine en diesel. In de innovatiescenario's is dit aandeel hoger. Om een maximum emissiereductie potentieel te bepalen voor dit transitiepad, wordt innovatiescenario 1 gebruikt: het innovatiescenario met het hoogste aandeel biobrandstoffen (relatief en absoluut). Mocht één van de twee innovatieve technologieën waterstof of elektriciteit op grote schaal doorbreken, dan zal het emissiereductie potentieel van biobrandstoffen lager uitvallen. Enerzijds vanwege de substitutie van conventionele brandstoffen benzine en diesel, anderzijds vanwege de concurrentie om biomassa voor het schoner produceren van de nieuwe brandstof. Van de overige innovatiescenario's is Scenario 2 gekozen om inzicht in deze ondergrens te geven.



Figuur 4.2 *CO₂-ketenemissiereductie potentieel biobrandstoffen*

In Scenario 1 stijgt de emissiereductie van 2,5 Mton CO₂ in 2020 tot 5,5 Mton CO₂ in 2040. In Scenario 2 is de reductie ongeveer de helft, toenemend tot bijna 3 Mton in 2040. Voor beide scenario's geldt dat de stijging tussen 2030 en 2040 in de emissiereductie vooral te danken is aan het hogere aandeel 2^e generatie biobrandstoffen. Voor dit transitiepad is op de lange termijn een emissiereductie van 3 tot 5,5 Mton CO₂ te verwachten. In 2040 wordt ongeveer de helft van de emissiereductie behaald in het vrachtvervoer. De reden hiervoor is dat dit één van de segmenten is waar geen andere alternatieve brandstoffen, zoals waterstof en elektriciteit, verwacht worden. Ook de penetratie van energiebesparende opties, zoals hybrides, is beperkt, en in combinatie met de forse groei in de verkeersprestatie van dit segment leidt dit tot een hoge vraag voor diesel met bijgemengde biodiesel. Bij de lichte voertuigen is het precies andersom, daar stabiliseert het reductiepotentieel door de afnemende vraag naar fossiele brandstoffen als gevolg van de sterke penetratie van alternatieve brandstoffen en energiebesparende opties.

Tabel 4.1 *Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - biobrandstoffen*

| | Scenario 1 | | | Scenario 2 | | |
|--|------------|--------|--------|------------|--------|--------|
| | 2020 | 2030 | 2040 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Δ CO ₂ ketenemissie (Mton) | 2,6 | 5,0 | 5,6 | 1,3 | 2,4 | 2,9 |
| Δ Brandstofkosten (€ mld) | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Δ Meerkosten Wagenpark (€ mld) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Δ Kosten - Totaal (€ mld) | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Kosten-effectiviteit (€/ ton CO ₂) | 125-150 | 75-100 | 75-100 | 125-150 | 75-100 | 75-100 |

De kosteneffectiviteit van biobrandstoffen daalt van circa € 150 per ton vermeden CO₂ in 2020 naar ongeveer € 75 per ton in 2040. In geval van hogere fossiele brandstofprijzen conform de gevoeligheidsanalyse in Paragraaf 3.2.2 zal de kosteneffectiviteit in 2020 onder de € 100 per ton zijn, en vanaf 2030 zelfs onder de € 50 per ton. De reden hiervoor is dat biobrandstoffen maar voor een beperkt deel afhankelijk zijn van de prijzen van fossiele brandstoffen.

4.3 Implicaties voor beleid

4.3.1 Uitdagingen

De belangrijkste barrières voor een verdere doorgroei van biobrandstoffen zijn momenteel de beschikbaarheid van duurzame grondstoffen voor 1^e generatie biobrandstoffen, en de technologische en marktrisico's van de 2^e generatie. In beperktere mate zijn er nog enkele bottlenecks in distributie en eindgebruik.

Productie van 1^e generatie biobrandstoffen

Hoewel de mondiale voedselprijzen in de afgelopen maanden alweer beduidend gedaald zijn, zal de duurzaamheidsdiscussie sterk van invloed blijven op de kansen voor 1^e generatie biobrandstoffen. De belangrijkste criteria waaraan biobrandstoffen moeten voldoen worden langzaam helder, maar er spelen nog diverse issues rond de uitwerking ervan in een certificeringssysteem. Dat heeft enerzijds betrekking op de kwantificering: de hoogte van bijvoorbeeld een norm voor een broeikasgasbalans kan bijvoorbeeld een knelpunt worden voor sommige ketens 1^e generatie. Maar in bredere zin lijkt het volledig uitsluiten van ongewenste impacts zodanig complexe regels te vereisen dat de praktische uitvoerbaarheid van het systeem in het geding komt. Volledigheid en werkbaarheid lijken moeilijk verenigbare doelstellingen.

Doorbraak 2^e generatie biobrandstoffen

Er is een redelijke consensus dat 2^e generatie biobrandstoffen betere broeikasgasbalansen hebben en minder duurzaamheidsproblemen met zich meebrengen. Zowel 2^e generatie FT-diesel als 2^e generatie ethanol zijn echter technisch nog niet volledig ontwikkeld. Bij FT-dieselproductie liggen de problemen met name in de grootschalige biomassavergassing en conditionering van het syngas, bij ethanol vooral bij de ontsluiting van de cellulose in de grondstof en de kosten van de enzymen voor afbraak van cellulose tot suikers. Daarnaast brengen deze technologieën (met name FT-diesel) hoge investeringskosten met zich mee.

Distributie en eindgebruik

Een van de belangrijkste voordelen van biobrandstoffen is dat in distributie en eindgebruik nauwelijks aanpassingen nodig zijn. Toch zijn er enkele belemmeringen:

- Bij bijmenging van (lage percentages) ethanol in benzine wordt een brandstof gevoeliger voor water in het systeem, wat inhoudt dat opslagsystemen beter moeten worden afgesloten voor water(damp).
- Voor hogere percentages ethanol zijn aanpassingen aan het voertuig noodzakelijk. De kosten zijn echter beperkt: een Flexi-Fuel Vehicle (FFV) wat rijdt op brandstof met ethanolgehalten tussen 0% en 85% hoeft slechts enkele honderden euro's meer te kosten dan een conventionele benzineauto.

- Bijmenging van biodiesel gaat bij lage gehalten zonder problemen; bij hogere mengsels nemen de emissies van NO_x en fijn stof toe.

FT-diesel kent geen barrières in distributie of eindgebruik; het is kwalitatief superieur aan conventionele diesel.

4.3.2 Internationaal perspectief

Met de Commissie Cramer heeft Nederland zich gepositioneerd als één van de trekkers in de discussie rond duurzaamheid van biobrandstoffen. Een dergelijk systeem functioneert echter beter naarmate het op grotere schaal (meer lidstaten, meer toepassingsgebieden van een product) wordt toegepast. Nederland is in een uitstekende positie om de discussie rond duurzaamheid en certificering te sturen, maar een concreet systeem zal beter werken wanneer het bijvoorbeeld op EU-niveau wordt ingevoerd.

Voor het beperken van de concurrentie om grondstoffen tussen 1^o generatie biobrandstoffen met voedselproductie dient sterk te worden ingezet op het rationaliseren van de landbouw en het verhogen van de opbrengsten per hectare. Omdat de grootste mogelijkheden daarvoor buiten Nederland liggen (binnen de EU in Oost-Europa, buiten de EU in bijvoorbeeld sub-sahara Afrika en de voormalige landen van de Sovjet-Unie) vereist dit minimaal een aanpak op EU-niveau. Ook hiervoor geldt overigens dat Nederland een sterke reputatie heeft op het gebied van landbouw en ontwikkeling. Nederland kan de belangrijkste uitdagingen agenderen in gremia als de FAO en voeden met 'Wageningse' expertise. Hier zijn sterke raakvlakken tussen bioenergie en bestrijding van armoede en honger.

De ontwikkeling van technologie voor 2^o generatie biobrandstoffen heeft bij uitstek een internationale dimensie. Momenteel zijn het vooral Amerikaanse en Franse partijen die werken aan 2^o generatie ethanol, en Duitse partijen die werken aan FT-diesel. Shell (met aandelen in het Canadese Iogen en het Duitse Choren) en Nedalco spelen echter ook een rol. De mate waarin deze technologieën uiteindelijk in de markt zullen komen is al met al sterk afhankelijk van ontwikkelingen in het buitenland. Bovendien worden 2^o generatie biobrandstoffen in de EU-richtlijn extra gestimuleerd.

4.3.3 Rol van de overheid

De overheid heeft een essentiële rol bij de verantwoorde introductie van biobrandstoffen:

- Op korte en middellange termijn zijn biobrandstoffen naar verwachting nog structureel duurder dan fossiele brandstoffen. Daarom is specifiek beleid essentieel om een markt te creëren. De overheid kan daarbij ook duurzaamheidseisen stellen aan biobrandstoffen.
- Op systeemniveau is het stimuleren van de landbouwproductiviteit, zowel in Europa als mondiaal, van groot belang. Ook dit is een veld waar de overheid historisch gezien sterke toegevoegde waarde heeft getoond.
- De introductie van 2^o generatie biobrandstoffen kan door een overheid worden gestimuleerd op basis van de verwachte gunstige externe effecten.
- Voor de doorgroei van ethanol op lange termijn is de introductie van FFV's relevant. Hoewel waarschijnlijk niet onmisbaar kan de overheid hier waarde toevoegen door het kip-ei probleem van parallelle introductie van FFV's en E85-pompstations te doorbreken.

Qua instrumentarium ligt bij biobrandstoffen logischerwijs de nadruk op het verbruik van de (alternatieve) brandstof. Het gaat in alle gevallen om beleid dat relevant is voor de korte termijn.

- Voor de stimulering van biobrandstoffen zelf zijn verplichtingen en accijnsvrijstellingen de meest gangbare instrumenten wereldwijd. Deze instrumenten hebben wel de beperking van elk middelenbeleid: de aansluiting bij de oorspronkelijke beleidsdoelen is beperkt. Teneinde deze instrumenten daar beter bij te laten aansluiten kunnen deze ook worden gedifferentieerd tussen biobrandstoffen op basis van hun CO₂-uitstoot. Wat betreft andere duurzaamheidsaspecten ligt de verdere ontwikkeling van een verplichte certificering voor de hand. Daarin kan

ook een minimumgrens voor CO₂-prestatie worden opgenomen. Dat is een minder gericht middel dan differentiatie op basis van CO₂, maar op korte termijn praktisch wellicht makkelijker implementeerbaar.

- Het versterken van de landbouw, nodig voor het verminderen van de food-fuel concurrentie, kan binnen Europa logischerwijs het beste op EU-niveau te worden opgepakt; Nederland kan hier een stimulerende rol in spelen. In het kader van ontwikkelingssamenwerking kan Nederland bovendien een ondersteunende rol spelen voor het versterken van de landbouw in bijvoorbeeld sub-sahara Afrika. Op dit moment is niet goed te zeggen is wat verwacht kan worden van de ontwikkelingen in de landbouw, en de mate waarop extra vraag naar grondstoffen kan worden opgevangen. Dit zou enige flexibiliteit in het beleid onder bullet 1 rechtvaardigen: bijvoorbeeld een periodieke heroverweging van de hoogte van een verplichting.
- De introductie van 2^e generatie biobrandstoffen vereist in de eerste plaats R&D-inspanningen. Die zullen grotendeels door private partijen worden gedaan, maar ook overheidsprogramma's kunnen hier een rol spelen. Bovendien gaat de introductie van 2^e generatie biobrandstoffen (met name FT-diesel) gepaard met investeringsrisico's die beduidend groter zijn dan bij 1^e generatie biobrandstoffen. De overheid kan hierbij ook een ondersteunende rol spelen, bijvoorbeeld door garant te staan op investeringen, het fiscaal stimuleren via groenfinanciering, of zelfs door een minimum prijsniveau te ondersteunen. In een later stadium zou het meer voor de hand liggen dat 2^e generatie biobrandstoffen concurreren met 1^e generatie, bijvoorbeeld in een systeem waarbij wordt gedifferentieerd naar CO₂-prestatie.
- Wat betreft de stimulering van FFV's en E85-pompen: De Zweedse overheid heeft deze ontwikkeling effectief ondersteund met een pakket van onder meer een combinatie van aanschafsubsidies en praktische voordelen (zoals een lager parkeertarief of belastingonthefing op rijden in de Stockholmse binnenstad) en een verplichting van alle tankstations voor het plaatsen van minimaal één pomp met een 'hernieuwbare' brandstof (in de praktijk E85 of groen gas). FFV's en E85-pompen zijn overigens pas relevant wanneer het moment in zich komt dat een doelpercentage voor bioethanol niet meer gerealiseerd kan worden met generieke bijmenging; dat is pakweg na 2015. Het eerder starten met stimuleren van FFV's heeft wel als voordeel dat een deel van het rijdende wagenpark in 2015 al voorbereid is op E85. Dit zou het eenvoudigst te realiseren zijn indien Europa hierin het voortouw neemt. Het is ook mogelijk om in een coalitie met een aantal Europese koplopers verdere stappen te nemen. In Europees verband kan ook gestreefd worden naar het verplicht maken van de FFV technologie (als standaard).

5. Transitiepad waterstof

5.1 Ontwikkelingsperspectief

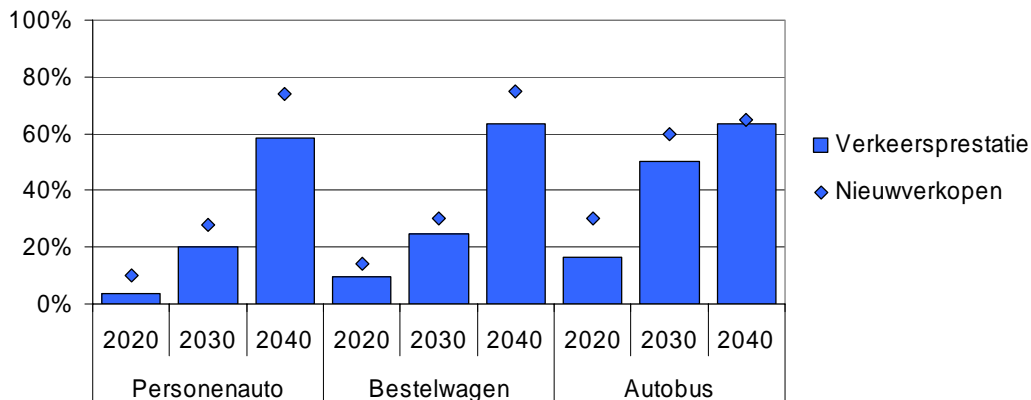
Waterstof is een koolstofloze energiedrager die op diverse manieren geproduceerd kan worden. De toepassing van waterstof voor wegverkeer is momenteel in de voorbereidende fase van grootschalige demonstratieprojecten en nog niet commercieel beschikbaar. Toepassing wordt vooral verwacht bij lichte voertuigen en autobussen. Voor vrachtwagens en touringcars is waterstof minder interessant vanwege de lagere energiedichtheid in combinatie met de lange afstanden die worden afgelegd. Daarnaast is de efficiëntie winst van een brandstofcel voertuig ten opzicht van een verbrandingsmotor minder groot doordat over grote afstanden met constante snelheid wordt gerekend bij een maximale efficiëntie van de verbrandingsmotor. Waterstof heeft een hoge efficiëntie over de keten gezien, zeker indien gecombineerd met een brandstofcelauto. Er kunnen meer kilometers gereden worden per eenheid biomassa dan mogelijk is met biobrandstoffen (Uyterlinde et al., 2007).

De doorbraak van waterstof vergt een enorme transitie, die of succesvol is of niet. Buiten een paar mogelijke niches zoals stadsbussen, lijkt een gedeeltelijke doorbraak niet realistisch. De reden hiervoor is de lastige combinatie van hoge ontwikkelingskosten van de automobielenindustrie enerzijds en hoge investeringskosten voor de infrastructuur anderzijds. De initiële barrières die moeten worden overwonnen zijn groot, zie Paragraaf 5.3 voor details. Maar als die overwonnen zijn, dan kan deze technologie ook echt de dominante technologie worden voor lichte voertuigen en autobussen. De brandstofcelauto komt vanwege zijn hogere efficiëntie al in een vroeg stadium als winnaar uit de bus in vergelijking met de ICE-variant op waterstof. Met als resultaat dat de ICE-variant geen noemenswaardig marktaandeel krijgt.

De succesvolle doorbraak van waterstof is als transitiepad uitgewerkt in Scenario 2. Tot 2020 speelt waterstof slechts een beperkte rol omdat de technologie pas rond 2015 commercieel op grote schaal beschikbaar zal zijn voor de lichte voertuigen (zie ook HyLights/HyWays). Figuur 3.1, Figuur 3.2 en Figuur 3.3 illustreren deze langzaam op gang komende penetratie van waterstof brandstofcelauto's in het Nederlandse wagenpark. Deze penetratie is gebaseerd op de volgende ontwikkelingen in Scenario 2, die voor het wagenpark samengevat zijn in Figuur 5.1:

- **Infrastructuur:** Tot 2015 is er een aantal gebieden, voornamelijk rond de grote steden, waar een beperkte lokale infrastructuur van vulpunten is aangelegd, die voornamelijk van waterstof wordt voorzien via tankwagens. Rond 2015 is er binnen Nederland (en Europa) een voldoende dekkend netwerk met vulpunten, waardoor de grootschalige commerciële introductie kan beginnen. Na 2030 wordt het door de groeiende vraag naar waterstof rendabel om het bestaande waterstof pijpleidingennetwerk verder uit te breiden naar de nog niet bediende delen van Nederland.
- **Personenauto's:** In eerste instantie zijn het vooral de benzine voertuigen die worden vervangen door waterstof brandstofcelauto's. Rond 2020 is 1 op de 10 verkochte auto's een waterstof brandstofcelauto. Op dat moment zijn er in Nederland al ongeveer 250.000 auto's verkocht, en zijn de meerkosten voor deze voertuigen acceptabel. Door de dalende meerkosten en het stimuleringsbeleid van de overheid zal dit aandeel in de nieuwverkopen snel verder stijgen via bijna 30% in 2030 naar 75% in 2040.
- **Bestelwagens:** In dit segment zal de introductiefase een paar jaar eerder plaatsvinden omdat sommige bedrijven al kunnen opereren zonder een dekkend landelijk netwerk van vulpunten. De reden hiervoor is het lokale karakter van de inzet van hun bestelwagens. Waterstof penetreert door deze vroegere start, in combinatie met een hogere vervangingssnelheid sneller dan personenwagens, ondanks een vergelijkbaar aandeel in de nieuwverkopen vanaf 2030.
- **Autobussen:** Voor deze voertuigen is de technologie het dichtste bij commerciële toepassing. Vanwege de voornamelijk captive fleets met relatief korte levensduur, is hier door middel van innovatieconcessies een goede mogelijkheid voor waterstof om relatief snel in het wa-

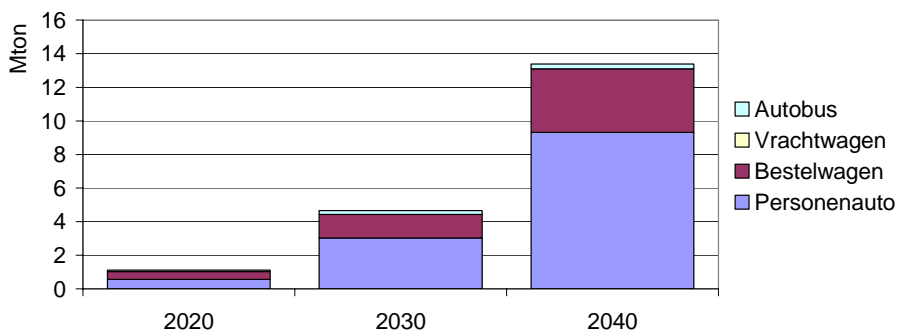
genpark te penetreren. In 2020 heeft waterstof al een aandeel van 30% van de nieuwverkopen, dat verdubbelt tot 60% in 2030. In 2040 rijden alle nieuw verkochte stad- en streekbussen op waterstof. Het touringcar wagenpark, met ongeveer 1 op de 3 autobussen, blijft echter (deels hybride) op diesel opereren.



Figuur 5.1 Aandeel waterstof brandstofcelauto's

5.2 Emissiereductie & kosteneffectiviteit

Door de beperkte penetratie van waterstof in 2020, is het reductiepotentieel slechts 1 Mton CO₂. Dit potentieel groeit echter fors door het snel stijgende aandeel, via 4,5 Mton in 2030 tot ruim 13 Mton in 2040. Deze emissiereductie is bepaald op basis van de veronderstelling dat de waterstof die nodig is voor de transportsector, geproduceerd wordt uit aardgas via Steam Methane Reforming (SMR) met CCS.



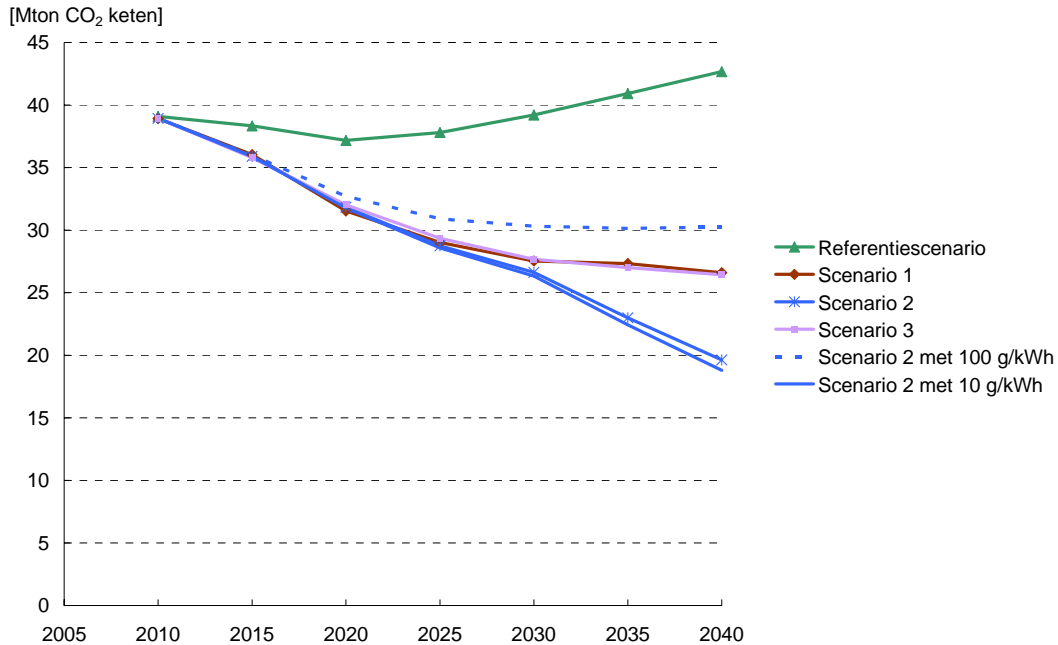
Figuur 5.2 CO₂-ketenemissiereductie potentieel waterstof

Momenteel wordt waterstof slechts voor industriële toepassingen geproduceerd, waarbij SMR wel de dominante technologie is, echter zonder CCS. Met een gevoeligheidsanalyse is de impact bepaald op het emissiereductiepotentieel als CCS niet van de grond komt en alternatieve productieroutes gebruikt worden om de additionele vraag naar waterstof te voldoen. Er zijn twee alternatieven bekeken. Het eerste, tot meer emissies leidende alternatief, betreft de centrale productie op basis van SMR zonder CCS met aardgas dat over 4000 tot 7000 km getransporteerd is. Een veel duurzamer alternatief is het produceren van waterstof op basis van duurzame energie, zoals hout of wind. Tabel 5.1 levert de resulterende emissiefactoren inclusief een opslag voor de indirecte emissies als gevolg van de elektriciteit die nodig is voor de compressie bij de pomp. Zij zijn gebaseerd op een studie naar de Well-to-Tank emissies van diverse productieroutes van waterstof (zie EUCAR, CONCAWE en JRC/IES, 2007).

Tabel 5.1 *Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse emissiefactoren waterstof*

| CO ₂ -emissiefactor [g/MJ] | Direct | Keten |
|---|-----------|-----------|
| | 2010-2040 | 2010-2040 |
| Basis - SMR met CCS | 0,0 | 16,6 |
| Laag - H ₂ o.b.v. hout of wind | 0,0 | 10,0 |
| Hoog - SMR zonder CCS | 0,0 | 100 |

Figuur 5.3 toont hoe deze uitgangspunten de ketenemissies van Scenario 2 voor het wegverkeer beïnvloeden.



Figuur 5.3 *CO₂-ketenemissie wegverkeer: gevoeligheidsanalyse emissiefactor waterstof*

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat als waterstof met behulp van SMR geproduceerd wordt, CCS essentieel is. Bij productie met SMR zonder CCS, gaat het grootste deel van de emissiereductie door waterstof verloren, en zal de kosteneffectiviteit sterk verslechteren. Er wordt dan nog slechts 3 Mton door waterstof gereduceerd in 2040. Ook blijkt dat een veel hogere emissiereductie nauwelijks mogelijk is door een schonere productieroute: een duurzamere productieroute o.b.v. hout of wind, verhoogt de emissiereductie door waterstof in 2040 met ongeveer 6% tot ruim 14 Mton ten opzichte van het referentiescenario.

Tabel 5.2 *Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - waterstof*

| | 2020 | 2030 | 2040 |
|--|------|---------|---------|
| Δ CO ₂ ketenemissie (Mton) | 1,1 | 4,7 | 13,4 |
| Δ Brandstofkosten (€ mld) | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| Δ Meerkosten Wagenpark (€ mld) | 0,2 | 0,7 | 1,4 |
| Δ Kosten - Totaal (€ mld) | 0,4 | 0,8 | 1,5 |
| Kosten-effectiviteit (€/ ton CO ₂) | >300 | 150-200 | 100-125 |

De kosteneffectiviteit van waterstof daalt van circa € 300 per ton vermeden CO₂ in 2020 naar ongeveer € 100 per ton in 2040. Deze daling is het resultaat van dalende meerkosten per voertuig en afnemende brandstofkosten.

In geval van hogere fossiele brandstofprijzen conform de gevoeligheidsanalyse in Paragraaf 3.2.2 zal de kosteneffectiviteit in de betreffende periode nauwelijks dalen en voor ieder zichtjaar in dezelfde range blijven. De reden hiervoor is het feit dat de kosten van waterstof uit aardgas (SMR) sterk afhankelijk zijn van de prijzen van fossiele brandstoffen.

5.3 Implicaties voor beleid

5.3.1 Uitdagingen

De introductie van waterstof in transport vereist een verandering van het energiesysteem. Voor zowel productie als infrastructuur is er een groot aantal mogelijke opties die deel uit kunnen maken van de keten. Welke opties uiteindelijk dominant zullen zijn hangt af van of bepaalde opties succesvol kunnen worden ontwikkeld (kosten, performance). Ook is de invulling waarschijnlijk tijds- en locatieafhankelijk.

Productie

Waterstof wordt in de industrie al grootschalig geproduceerd uit aardgas via SMR (steam methane reforming). Indien waterstof als 'sustainable' energiedrager voor transport wordt ingezet zal bij de productie uit fossiele energiedragers (kolen, aardgas) CCS moeten worden toegepast. Deze technologie bevindt zich dicht bij de demonstratiefase. CCS is geen noodzakelijke techniek indien waterstof via vergassing van biomassa wordt geproduceerd. Deze route is nog niet (grootschalig) gedemonstreerd. Maar verwacht wordt dat op de lange termijn (na 2030) waterstof op basis van elektrolyse (met elektriciteit uit duurzame bronnen) rendabel kan worden. De vergassingsroute is pas relevant indien de waterstofvraag voldoende groot is. Tot die tijd kan voorzien worden in de vraag via waterstof dat als bijproduct vrijkomt in de industrie of via kleinschalige productie op basis van elektrolyse.

Infrastructuur

Er is een aantal opties voor transport van waterstof: via pijpleidingen, als vloeibaar waterstof in tank auto's, als hoge druk waterstof en indirect via lokale productie uit een andere energiedrager (bijvoorbeeld via elektrolyse). Hoewel er een aantal waterstofpijpleidingen ligt in de omgeving van Rotterdam met een connectie naar Antwerpen, is distributie via pijpleidingen pas een optie bij een hoge waterstofvraag (enkele niches uitgezonderd). Technisch zou dit geen problemen op moeten leveren gezien de aanwezige ervaring vanuit Rotterdam, maar op het gebied van infrastructuurle planning zullen waarschijnlijk de nodige hobbels overwonnen moeten worden. Nog niet duidelijk is aan welke wettelijke eisen vervoer en lokale opslag van vloeibaar waterstof moet voldoen (waterstof heeft in dit geval een extreem lage temperatuur). Wel is er in Nederland inmiddels ervaring met het vervoer van waterstof onder zeer hoge druk, echter niet met opslag op publiek toegankelijke terreinen zoals een publiek tankstation. Vervoer van waterstof onder zeer hoge druk is, gezien de geringe energiedichtheid, alleen een optie bij een zeer geringe vraag. Vervoer en opslag van waterstof in vloeibare vorm is de meest geëigende oplossing bij een verder toenemende vraag. Pas bij een zeer hoge vraag wordt het rendabel om waterstof via een pijpleidingennetwerk te gaan transporteren (HyWays, 2007).

Op dit moment is er een aantal oplossingen die het mogelijk maken om de vultijd te beperken tot enkele minuten. Deze technieken zijn nog niet grootschalig gedemonstreerd. Ook is het de vraag in hoeverre bestaande tankstations voorzien kunnen worden van de faciliteiten om waterstof te leveren. Om de infrastructuur rendabel te kunnen ontwikkelen is een snel toenemende vraag noodzakelijk. Zelfs in dat geval is de terugverdientijd - beschouwd vanuit industrieel perspectief - zeer lang.

Eindverbruikstoepassingen

In principe kan waterstof zowel worden ingezet in verbrandingsmotoren als ook de brandstofcel. Slechts een beperkt aantal fabrikanten houdt zich bezig met de inzet in verbrandingsmotoren, het overgrote deel richt zich op inzet via de brandstofcel. De eerste prototypes worden op dit

moment getest. Het betreft hier in vrijwel alle gevallen omgebouwde conventionele voertuigen die van een brandstofcel in combinatie met een elektromotor zijn voorzien. Een brandstofcelauto is op dit moment nog niet commercieel verkrijgbaar. Zowel de aandrijflijn inclusief brandstofcel, als ook de opslag van waterstof in de auto moet nog verder worden ontwikkeld. Voor de brandstofcel geldt dat voor zowel de levensduur (tolerantie van vervuiling, aantal start-stop cycli) als voor de materiaalkosten (o.a. platina) nog aanzienlijke onderzoeksinspanningen nodig zijn. Vervolgens zullen door opschaling de kosten van het brandstofcelvoertuig fors naar beneden kunnen (en moeten) gaan. Het is hierbij niet eenvoudig te concurreren met de conventionele technologie die al decennia lang op zeer grote schaal wordt geproduceerd.

Naast het overwinnen van barrières in elk van de afzonderlijke delen van de energieketen moet ook de ontwikkeling binnen elk van deze delen op elkaar zijn afgestemd (productie, infrastructuur, vraag). De schaalgrootte voor de ontwikkeling van de technologie is zodanig dat deze niet meer nationaal maar minimaal Europees en liefst mondiaal moet worden ontwikkeld. Voor stadsbussen volstaat een kleinere schaalgrootte.

Actoren

Voor de verdere ontwikkeling van brandstofcelvoertuigen is een combinatie van lange termijn en toegepast onderzoek nodig om een aantal technische barrières te overwinnen. Research instituten moeten hier samenwerken met industrie, gefinancierd vanuit de Europese en nationale overheid. Hiervoor zullen onderzoeksprogramma's moeten worden opgezet. De (mondiale) automobielenindustrie zal de huidige prototypes moeten doorontwikkelen tot voertuigen specifiek ontworpen voor brandstofcellen die geschikt zijn voor serieproductie. Het brandstofcelvoertuig kan gezien worden als een doorontwikkeling van de plug-in hybride waarbij de verbrandingsmotor die als generator wordt gebruikt vervangen wordt door de brandstofcel. De plug-in hybride kan echter ook fungeren als opmaat naar een all-electric voertuig. Gezien de prestaties van de huidige waterstof voertuigen met een brandstofcel mag aangenomen worden dat de prestaties (actieradius, topsnelheid) van het brandstofcelvoertuig dicht bij de prestaties van het conventionele voertuig komen te liggen. Daarnaast zal een waterstofinfrastructuur moeten worden opgezet. Wie hier het initiatief neemt is niet duidelijk. Industriële partijen die verschillende gassen, waaronder waterstof, produceren zijn wel geïnteresseerd maar terughoudend vanwege de nog aanzienlijke risico's, zoals de onzekere ontwikkeling van de vraag en de verwachte lange terugverdientijden. De opbouw van productie-eenheden kan ook door verschillende actoren worden verzorgd, waaronder de olie-industrie, de energiebedrijven en de gasindustrie. Voor de olie-industrie geldt dat deze nieuwe ontwikkeling ten koste gaat van hun core-business (conventionele brandstoffen). Voor de E-bedrijven is de inzet op elektrische voertuigen minder complex (geen elektrolyse of vergassing nodig om een energiedrager voor het voertuig te leveren). Voor zowel de E-bedrijven als de gas-industrie betreft het een expansie van haar activiteiten.

5.3.2 Internationaal perspectief

Via het in 1990 ingevoerde ZEV-mandate in Californië waren alle grote automobielfabrikanten gedwongen om vanaf 1998 zero-emission vehicles te introduceren binnen Californië. Het ZEV-mandate schreef ook voor hoe het aandeel van zero-emission vehicles jaarlijks toe zou moeten nemen. De sancties op het niet voldoen aan de verplichting waren zodanig fors dat de automobielenindustrie gedwongen was om of de brandstofcelvoertuigen te ontwikkelen of om de grote Californische markt links te laten liggen, met als risico dat ook andere staten in Amerika zouden volgen. In 2008 is het ZEV-mandate verbreed, zodat ook via (plug in) hybride voertuigen en elektrische voertuigen aan de verplichting kan worden voldaan.

Binnen de kader programma's van de EC maar ook via nationale programma's is vooral gewerkt aan het verbeteren van de brandstofcel en overige componenten zoals opslag, productie en infrastructuur. Dit heeft geleid tot een aantal kleinschalige demonstratieprojecten van eerste generatie prototypes. Inmiddels zijn de prototypes zover doorontwikkeld dat gesproken wordt over grootschalige demonstratieprojecten (orde grootte: enkele honderden voertuigen). Via het huidige EC-instrumentarium is het echter niet mogelijk om dit type project te ondersteunen (beperkte

serieproductie). De instrumenten op Member State niveau zijn vooral gericht op het ondersteunen van technologieën die de demonstratiefase zijn doorlopen en de stap naar grootschalige serieproductie (bijna) hebben gemaakt.

Beoogd wordt dit gat tussen de stimuleringsinstrumenten op Europees en nationaal niveau te dichten via een zogeheten Joint Technology Initiative (JTI), een public private partnership tussen de EC en de industrie. Binnen dit programma is er wel ruimte om grootschalige demonstratieprojecten te financieren. Verder is in Duitsland een fors budget (M€ 500) beschikbaar voor het ondersteunen van de automobiellindustrie bij het ontwikkelen van brandstofcelvoertuigen. Ook dit kan worden aangewend voor grootschalige demonstratieprojecten.

De ontwikkeling van waterstoftechnologie en de introductie hiervan heeft verschil per deelmarkt. Voor personenvoertuigen is sprake een mondiale markt. Er zijn een beperkt aantal grote voornamelijk mondiaal opererende fabrikanten. Voor busvervoer geldt dat door incentives via de Nederlandse markt het mogelijk is om prikkels af te geven die leiden tot productontwikkeling. Nederland (maar ook België) beschikt bijvoorbeeld over een fabrikant van bussen. Voor de introductie van waterstof en brandstofcelvoertuigen in Nederland, is Nederland allereerst afhankelijk van de keuze die de grote automobiefabrikanten maken. Deze beslissingen zijn alleen te beïnvloeden op Europees niveau, maar zouden bij voorkeur aan moeten sluiten bij ontwikkelingen in de VS en Japan. Wel kan Nederland, indien de automobiellindustrie zich richt op de ontwikkeling van brandstofcelvoertuigen, relatief zelfstandig beleid ontwikkelen voor de opbouw van de bijbehorende waterstofinfrastructuur. Wel is het hierbij zaak om wet- en regelgeving (bijvoorbeeld op het gebied van veiligheid) te harmoniseren binnen Europa. Op het gebied van stadsbussen kan Nederland in theorie een eigen koers varen. Via specifieke beleidsmaatregelen (bijvoorbeeld via criteria in de aanbesteding van openbaar vervoer) kan een markt voor brandstofcelbussen worden gecreëerd. Parallel daaraan kan de Nederlandse industrie gestimuleerd worden een brandstofcel bus te ontwikkelen. Het is hierbij essentieel om de ontwikkeling van de vraag aan te laten sluiten bij de ontwikkeling van het aanbod.

5.3.3 Rol van de overheid

Voor waterstof in transport geldt dat het hier een lange termijn optie betreft waar door de industrie niet autonoom sterk op zal worden ingezet. De lange termijn doelstellingen maken echter de introductie van nieuwe technologie noodzakelijk, doorontwikkeling (feitelijk: uitontwikkeling) van de huidige technologie biedt slechts beperkte mogelijkheden. De markt richt zich primair op het halen van korte termijn doelstellingen (bijvoorbeeld emissie-eisen ten aanzien van de CO₂ uitstoot per km). Voordat de kosten voor het behalen van toekomstige normen te hoog worden, moet via een geleidelijke route de volgende generatie technologie - die is gericht op systeemverandering - worden ontwikkeld. Hierbij moet zowel ondersteuning worden gegeven op het gebied van R&D als op het gebied van ontwikkeling van 'early markets'. De industrie zal pas een substantieel deel van haar eigen R&D-geld gaan gebruiken voor de lange termijn optie indien er voldoende marktperspectief is. De R&D-incentives moeten Europees worden gecoördineerd evenals de incentives voor marktontwikkeling. Echter, de incentives voor stimulering moeten op nationaal niveau worden geïmplementeerd (HyWays, 2007a).

Doordat barrières in alle delen van de energieketen moeten worden overwonnen is een specifiek op waterstof toegesneden support framework nodig dat voldoende flexibel is om de beoogde snelle kostendaling van waterstoftoepassingen te kunnen volgen en overstimulering te vermijden. In de initiële fase is generieke stimulering onvoldoende en mogelijk zelfs contra-productief doordat ook alternatieven die dicht bij de markt liggen (maar op de lange termijn minder potentie hebben) worden gestimuleerd.

De instrumenten op nationaal niveau die nodig zijn om waterstof vanuit grootschalige demonstratie verder te ondersteunen moeten nog ontwikkeld en geïmplementeerd worden. Zoals eerder aangegeven, betreft het hier een relatief complex instrumentarium doordat in de tijd veranderende barrières over de gehele keten moeten worden geadresseerd. Verwacht wordt (HyWays, 2007) dat nadat binnen Europa circa 100.000 brandstofcelvoertuigen zijn geïntroduceerd, het

verschil in kostprijs met conventionele voertuigen minder dan 10 €/km bedraagt. Deze (afnemende) meerkosten zijn te overbruggen via een combinatie van generieke instrumenten zoals incentives bij aankoop en gebruik of bezit.

Voor het ontwikkelen van waterstof in transport is het nodig om via nationale programma's lange termijn en toegepast onderzoek op het gebied van waterstof in transport te blijven ondersteunen. Om de initiële barrières bij de grootschalige introductie te overwinnen, moeten daarnaast instrumenten ontwikkeld en geïmplementeerd worden die in staat zijn de uiteenlopende, en in de tijd veranderende, barrières te adresseren. Zowel op het gebied van ontwikkeling als op het gebied van implementatie moet aangesloten worden bij ontwikkelingen in het buitenland; dit vanwege de schaalgrootte van de technologie. Op termijn kunnen deze technologie specifieke instrumenten worden vervangen door generiek stimuleringsbeleid.

6. Transitiepad hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer

6.1 Ontwikkelingsperspectief

Voor een duurzaam en schoon wegtransport, in de zin dat er geen luchtvervuiling via de uitlaat veroorzaakt wordt, is de elektromotor de ideale aandrijving. Voor de levering van de elektriciteit zijn er twee voor de hand liggende opties: een brandstofcel op waterstof, of elektriciteit uit accu's die via het elektriciteitsnet zijn opgeladen¹⁸. De brandstofcelauto is in het voorgaande hoofdstuk behandeld. In dit hoofdstuk behandelen we de andere optie: elektrisch vervoer. Na een overzicht van de relevante historische ontwikkelingen tot nu toe, zal het ontwikkelingsperspectief voor dit transitiepad geschetst worden.

De ontwikkeling van elektrische auto's tot nu toe

In de jaren '80 is er veel onderzoek gedaan om de remenergie uit bussen op te vangen (bijvoorbeeld met samengeperste lucht) en te gebruiken bij het optrekken. Hoewel de kosten voor grootschalige toepassing uiteindelijk te hoog bleken werd wel een kennisbasis gelegd voor hybride aandrijfsystemen. In de jaren '90 kwam de 'all electric car' grootschalig in de belangstelling. Uiteindelijk bleek de beperkte actieradius van de accu het belangrijkste knelpunt te zijn¹⁹. De accu technologie gaat op dat moment bijvoorbeeld over de verbeterde loodzuur accu, de nikkel-cadmium accu en natrium-zwavel accu, die een hogere gebruikstemperatuur heeft. Sinds 2000 is het accent in het onderzoek van de 'all electric car' grotendeels verschoven naar onderzoek naar de brandstofcelauto die men betere perspectieven toedichtte. Aanvankelijk werd hier eerst naar alle brandstoffen gekeken, dus ook naar benzine en diesel, later voornamelijk naar waterstof. In de loop van de tijd werd het onderzoek naar bussen met opslag van remenergie, wegens het hoge besparingspotentieel, wel voortgezet en concepten voor hybride voertuigen uitgewerkt en uitgetest. Ook Toyota kwam, gebruikmakend van de langzaam verbeterende accu technologie, met de eerste hybride personenauto.

De relevante voortgang vond echter niet alleen plaats in de transportsector, maar ook bij de mobiele elektronica. Met de ontwikkeling van laptops werd de vraag groter naar lichtgewicht accu's met een hoge energie-inhoud. Ook de steeds kleiner wordende mobiele telefoon vraagt om dergelijke accu's. Dit heeft tot een zeer hoge druk op de ontwikkeling van accu's geleid. Sindsdien zijn bijvoorbeeld verbeterde versies van nikkel-metaal-hydride, de zink-lucht en de lithium-ion accu's voor elektrische voertuigen beschikbaar gekomen. De afgelopen jaren lijkt de elektrische auto in een stroomversnelling gekomen te zijn. In drie jaar tijd is een ontwikkeling gerealiseerd die normaal een jaar of 15 kost. De snelle ontwikkeling betekent echter niet dat de elektrische auto hiermee marktrijp en concurrerend is. De accu blijft wat range, kosten en gewicht betreft nog een belangrijk knelpunt.

Inmiddels is de druk op vermindering van de CO₂-uitstoot van voertuigen ook toegenomen. In dit verband kan verwezen worden naar de convenanten van de Europese Unie met de auto-industrie. Ook binnen de VS is de druk op autofabrikanten toegenomen om zuiniger voertuigen te ontwikkelen. Toyota is doorgegaan met de productie van hybride voertuigen, en Honda is met een wat simpelere hybride gevolgd. Aan de bovenkant van de markt, is er bijvoorbeeld de Lexus hybride. Met een totale verkoop van meer dan een miljoen hybride voertuigen, is hybride een nog steeds kostbare, maar wel serieus te nemen technologie geworden. Uit de markt komt in-

¹⁸ Er zijn echter nog wel andere opties denkbaar. Zo kan de brandstofcel ook aangedreven worden via methanol uit biomassa of waterstof (gebruikmakend van afgevangen CO₂). Ook het gebruik van biogas is mogelijk. Wat betreft elektriciteit kan een voertuig, met beperkte accu's ook constant bijgeladen worden (bijvoorbeeld via een bovenleiding). Tenslotte is er ook nog de exotische optie om motorloze voertuigen te laten rijden via magneetvoortstuwing in het wegdek.

¹⁹ In dit kader moeten de ontwikkelingen in Californië rond de verplichte verkoop van ZEV (zero emission vehicle) voertuigen ook genoemd worden. Deze hebben de daadwerkelijke grootschalige implementatie erg dichtbij gebracht. De aanvankelijke doelen van deze wetgeving werden echter later naar beneden bijgesteld.

middels de vraag naar voren naar hybride voertuigen waarvan de accu thuis is op te laden, de zogenaamde plug-in hybrides. De eerste commerciële plug-in hybride voertuigen komen waarschijnlijk in 2010 op de markt. De eisen die een plug-in hybride aan de accu stelt zijn echter wel anders. Een accu in een hybride werkt meestal in een beperkt gebied, waarbij de accu in een redelijke beladingsstand blijft. Bij een plug-in hybride is het juist van belang dat de accu helemaal vol geladen kan worden en ook daarna weer redelijk leeg gereden kan worden. Voor een range van bijvoorbeeld 30 km is bovendien ook een groter accupakket nodig.

Ook kunnen plug-in hybrides en elektrische voertuigen bijdragen aan het verbeteren van de luchtkwaliteit. Wat betreft de plug-in hybrides speelt hierbij een rol in hoeverre de milieuwinst ook daadwerkelijk geboekt kan worden. Op dit moment behoren de plug-in hybrides wat luchtmissies betreft wel tot de schoonste voertuigen die verkocht worden²⁰. Er zijn op dit moment echter niet voldoende gegevens beschikbaar om hier, ook richting de toekomst harde conclusies uit te trekken. Voor wat betreft fijn stofemissies: deze worden ook veroorzaakt door de slijtage van de banden en het wegdek. Ook elektrische auto's zullen deze emissies dus veroorzaken. Wel zal de fijn stofemissie van de remvoeringen, bij alle elektrische en hybride voertuigen, lager zijn, omdat een deel van de remenergie voor hergebruik op een andere manier afgevoerd wordt.

Verschillende mogelijke ontwikkelingen van hybride naar elektrisch vervoer

Hybride voertuigen combineren een verbrandingsmotor met een elektromotor met accu en maken gebruik van de terugwinning van remenergie. De accu wordt onder het rijden opgeladen door een generator die wordt aangedreven door de verbrandingsmotor. Het hybride concept bouwt daarmee voort op conventionele technologie en heeft zich inmiddels in de praktijk bewezen. De brandstofbesparing van hybrides is het grootst in het stadsverkeer, bij veel optrekken en stoppen. De huidige 'eerste generatie' hybride die werkt met een dubbele aandrijflijn kan op termijn opgevolgd worden door de 'tweede generatie' waar de verbrandingsmotor nog slechts als elektriciteitsgenerator functioneert.

Naarmate de opslagcapaciteit, kWh elektriciteit per kg accugewicht, van accu's verbetert, komt de plug-in hybride in beeld. Deze kan een kleinere verbrandingsmotor hebben, en de accu wordt aan het stopcontact opgeladen. De elektrische actieradius is afhankelijk van de grootte van de accu's. Een volgende stap zou de vervanging van de verbrandingsmotor door een brandstofcel kunnen zijn, waarmee de overstap naar waterstof gemaakt kan worden. Als er echter een doorbraak komt in de opslagcapaciteit van de accu's, is een doorontwikkeling naar all-electric voertuigen te verwachten²¹. In het hieronder geschetste toekomstperspectief is van een voortgaande ontwikkeling van de reeds beschikbare accutechnologie uitgegaan.

Toekomstperspectief

In deze paragraaf wordt ingegaan op het scenariobeeld van elektrisch vervoer bestaande uit twee alternatieven: plug-in hybride en all-electric. De 'gewone' hybride kan gezien worden als een voorloper voor beide technieken en is momenteel in Nederland commercieel verkrijgbaar. Het marktaandeel is echter nog beperkt (minder dan 1%). Er bestaat via de BPM een fiscale stimulering van deze hybride auto's.

De opkomst van elektrisch vervoer wordt voorafgegaan door een sterke opkomst van hybrides bij de lichte voertuigen. Rond 2015 zal de helft van alle nieuw verkochte personenauto's hybride zijn (waarvan 1 op de 10 als plug-in). Het aandeel hybrides (inclusief plug-in hybrides)

²⁰ Omdat het om een nieuw type voertuig gaat, is het logisch dat men bij de ontwikkeling al rekening houdt met de strengere eisen die verwacht worden. Echter, als tijdens de testritten gedeeltelijk elektrisch wordt gereden (de testprocedures gaan hier inmiddels wel van uit) kan, bij gelijke eisen als voor auto's met alleen een verbrandingsmotor, de specifieke emissie tijdens het rijden op de verbrandingsmotor van de plug-in hybride weer toenemen.

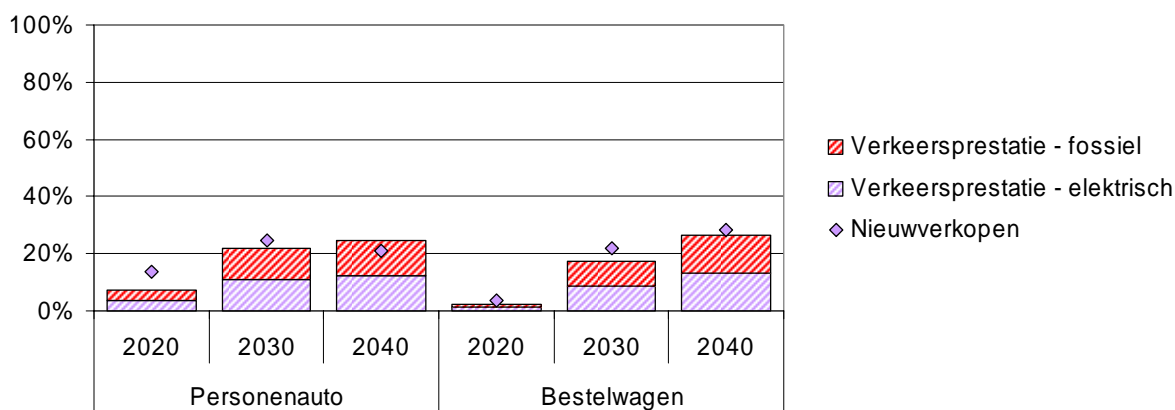
²¹ Het is zelfs mogelijk dat de ene elektromotor wordt vervangen door vier kleinere motoren in de wielen. Deze wielnaafmotoren worden al in vliegtuigen gebruikt. Er zijn inmiddels bussen die wielnaafmotoren gebruiken en er wordt gewerkt aan toepassing bij personenauto's. Het is denkbaar dat dit op termijn tot een herontwerp van de personenauto gaat leiden, met wellicht verdere kostendalingen. Hierover zijn in dit rapport geen veronderstellingen gedaan.

groeit via 85% in de nieuwverkopen in 2020 tot 100% in 2040. Bij een voldoende goede en beschikbare oplaadinfrastructuur, verbeterende technologie (met dalende meerkosten) en tevreden en enthousiaste gebruikers²² zullen na 2020 steeds meer eigenaren van een hybride voertuig overstappen naar de plug-in hybride. Met een elektrische actieradius van circa 30 km kan een gemiddelde gebruiker al circa de helft van de kilometers elektrisch rijden. Het aandeel plug-in hybrides stijgt hierdoor sterk. In 2030 worden al 4 van de 10 hybrides uitgevoerd als plug-in. Voor bestelwagens is een vergelijkbare ontwikkeling voorzien, die echter wat later op gang zal komen. Zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2 voor de ontwikkeling van het totale wagenpark.

In de tussentijd is de technologie voor all-electric voertuigen verder ontwikkeld en commercieel beschikbaar gekomen. Rond 2015 begint deze technologie het wagenpark langzaam te penetreren, in de segmenten waar een actieradius van 200 km, gezien de voordelen, het imago en de persoonlijke leefsituatie geen probleem vormt. Rond 2020 is de oplaadinfrastructuur ruim beschikbaar, dalen de kosten en neemt de actieradius langzaam toe. Ook is er een groep gebruikers die om heeft leren gaan met de andere actieradius en zijn er in de markt initiatieven ontstaan om hieraan tegemoet te komen²³.

Op dat moment is er ook al een groep bestuurder die ervaring met plug-in hybrides hebben opgedaan en het financiële voordeel van all-electric (er zijn wel meer accu's nodig, maar geen twee motoren) afwegen tegen de andere actieradius. Na 2020 zal de nieuwe groep all-electric rijders voornamelijk bestaan uit mensen die al ervaring met elektrisch rijden hebben opgedaan via een plug-in hybride. Aan het andere eind van de markt zijn er weer gebruikers die van een hybride overstappen naar een plug-in hybride. Vanaf 2030 is het effect van deze overstappers van plug-in hybrides naar all-electric zo groot dat het aantal plug-in hybrides in de nieuwverkopen zal stabiliseren. Deze ontwikkeling is ook terug te vinden in onderstaande Figuur 6.1 en Figuur 6.2, die de ontwikkeling tonen van het elektrisch vervoer en plug-in hybrides tussen 2020 en 2040.

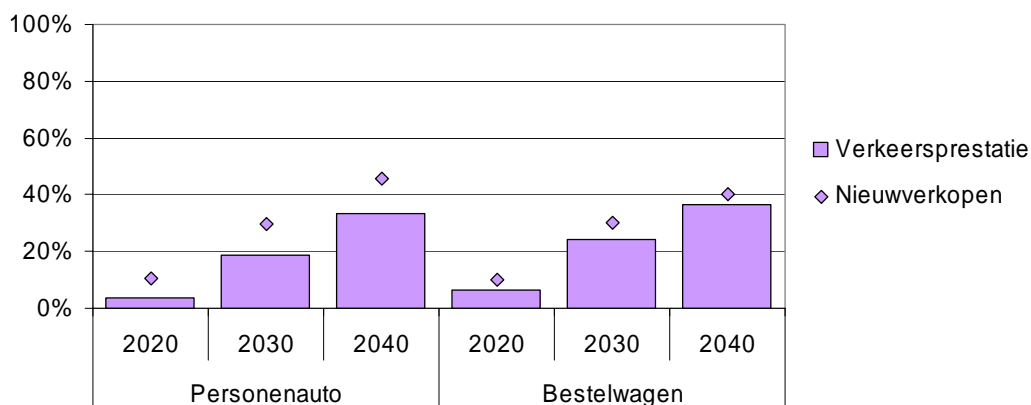
Het aandeel in de nieuwverkopen van de elektrische personenauto's stijgt van ongeveer 10% in 2020 tot een aandeel van ongeveer 45% in 2040. Het marktaandeel kan daarna nog verder stijgen. Belangrijk is wel om te vermelden dat elektrisch vervoer voor sommige segmenten een minder aantrekkelijke optie zijn, zoals 4WD's en caravaneigenaren, die uiteindelijk niet verder dan een plug-in hybride zullen gaan, en mensen die heel veel kilometers rijden (tenzij het actieradiusprobleem bijvoorbeeld via snelladers wordt opgelost). Ook hier wordt voor bestelwagens een vergelijkbare ontwikkeling verwacht.



Figuur 6.1 Aandeel plug-in hybride

²² Het imago van de plug-in hybride kan dan geschetst worden als modern, gemakkelijk (minder naar een tankstation), geluidsarm, milieuvriendelijk en dankzij een gericht overheidsbeleid financieel concurrerend.

²³ Er zijn waarschijnlijk wel mogelijkheden om deze problematiek deels op te lossen, zoals snelladen, wisselaccu stations en het incidenteel huren van auto's, maar die hebben allen hun eigen beperkingen, waarvan op dit moment nog niet duidelijk is of deze op termijn acceptabel zijn.

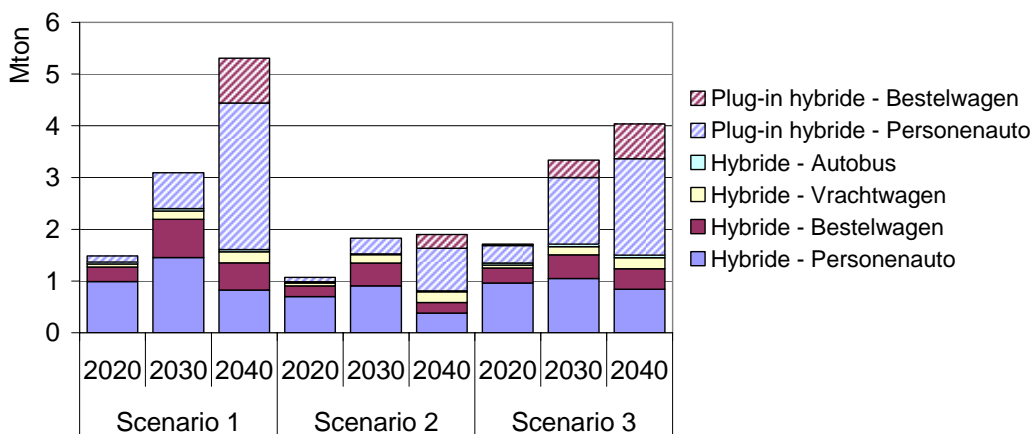


Figuur 6.2 Aandeel elektrisch vervoer (all-electric)

6.2 Emissiereductie & kosteneffectiviteit

6.2.1 Hybrides

Het reductiepotentieel van hybrides en plug-in hybrides is relatief onafhankelijk van de succesvolle doorbraak van elektrisch vervoer. Zij spelen ook een belangrijke rol in de transitie naar waterstof brandstofcelauto's en zijn zelfs de dominante technologie in Scenario 1, juist omdat waterstof en elektrisch vervoer allebei niet doorbreken. Binnen de verschillende scenario's is er een relatief grote bandbreedte in het reductiepotentieel van hybrides en plug-in hybrides, zie Figuur 6.3. In deze figuur staat alleen de reductie door deze twee technieken.

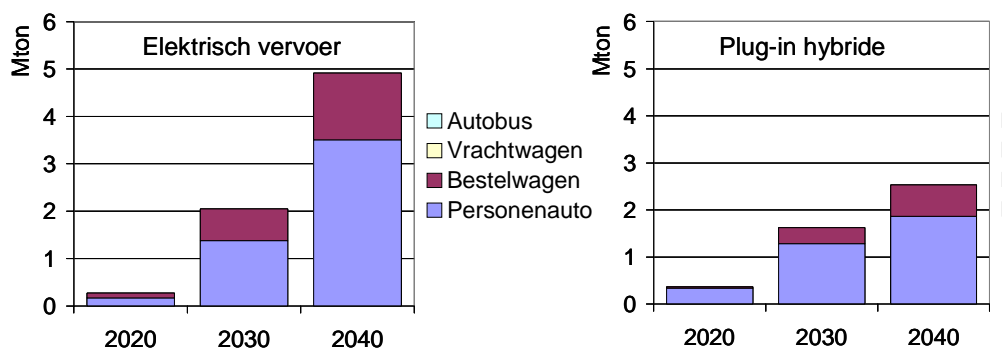


Figuur 6.3 CO₂-ketenemissiereductie potentieel hybride en plug-in hybride

Een groot deel van de hybride rijders zal op termijn overstappen naar een plug-in hybride met als mogelijke vervolgstap een waterstof brandstofcelauto (Scenario 2) of elektrisch vervoer (Scenario 3). Dit verklaart de daling voor het reductiepotentieel van hybrides tussen 2030 en 2040. Het reductiepotentieel van hybrides, exclusief plug-ins, is beperkt tot 1,5 Mton tot 2,5 Mton, maar kan, vanwege de huidige beschikbaarheid, in 2020 al grotendeels bereikt zijn. Aangezien hybrides en plug-in hybrides in alle scenario's een significante rol spelen (mogelijk alleen als tussenstap), vormen zij een robuuste no-regret optie. Het grootste deel van het reductiepotentieel wordt gerealiseerd bij de personenauto's en bestelwagens.

6.2.2 Elektrisch vervoer en plug-in hybrides

Voor het transitiepad elektrisch vervoer is ook de plug-in hybride meegenomen aangezien zij voor de helft van haar vervoersprestatie ook op elektriciteit uit het elektriciteitsnet rijdt. Scenario 3 is gebruikt om het reductiepotentieel van deze twee opties te bepalen, de resultaten zijn opgenomen in Figuur 6.4. Door de langzame penetratie van elektrisch vervoer en plug-in hybrides tot 2020, is het reductiepotentieel in 2020 nog minder dan 1 Mton CO₂. Dit potentieel groeit echter fors door het snel stijgende aandeel, via 3,5 Mton in 2030 tot ruim 7,5 Mton in 2040. Na 2030 is de stijging vooral te danken aan de verdergaande penetratie van elektrisch vervoer. In 2040 is het reductiepotentieel van elektrisch vervoer bijna twee keer zo groot als het reductiepotentieel van plug-in hybrides.



Figuur 6.4 CO₂-ketenemissiereductie potentieel elektrisch vervoer en plug-in hybride

Dit emissiereductie potentieel is bepaald op basis van de veronderstelde ontwikkeling van de gemiddelde emissiefactor van elektriciteit van het gemiddelde Nederlandse productiepark. De ontwikkelingen in het Nederlandse productiepark zijn gebaseerd op de belangrijkste ontwikkelingen van overheidsprogramma Schoon en Zuinig, zie o.a. (Menkveld, 2007). Er is een aantal uitgangspunten aangepast voor het ambitieniveau van de innovatiescenario's. De belangrijkste wijzigingen betreffen een toename van het aandeel duurzame elektriciteit en het toepassen van CCS (CO₂-afvang en -opslag) bij een aantal elektriciteitscentrales. De resulterende emissiefactor daalt hierdoor van 500 g/kWh in 2020 naar 300 g/kWh in 2040. Bijlage B bevat een beschrijving van de uitgangspunten.

Het gebruiken van de emissiefactor van het parkgemiddelde hoeft echter niet het beste inzicht te geven in de additionele emissies als gevolg van de toegenomen vraag naar elektriciteit in de transportsector. Een nauwkeuriger aanpak zou de marginale emissiefactoren bepalen, dus op basis van de mix van elektriciteitscentrales die extra nodig zijn (of extra productie draaien) om de extra vraag van de transportsector te voldoen. Dit is een complex vraagstuk met veel onzekerheden, en verdient aparte studie²⁴. Ook relevant is hoe de infrastructuur voor het opladen vorm krijgt, en wanneer opgeladen zal worden. In deze studie is gekozen om naast de emissiefactor van het gemiddelde elektriciteitspark, een gevoeligheidsanalyse uit te voeren met twee alternatieve emissiefactoren, gebaseerd op twee alternatieve productieroutes voor de elektriciteit voor de transportsector:

- Laag: elektriciteit uit een mix van nieuwe met CCS uitgevoerde kolen- en gascentrales.
- Hoog: elektriciteit uit nieuwe kolencentrales zonder CCS.

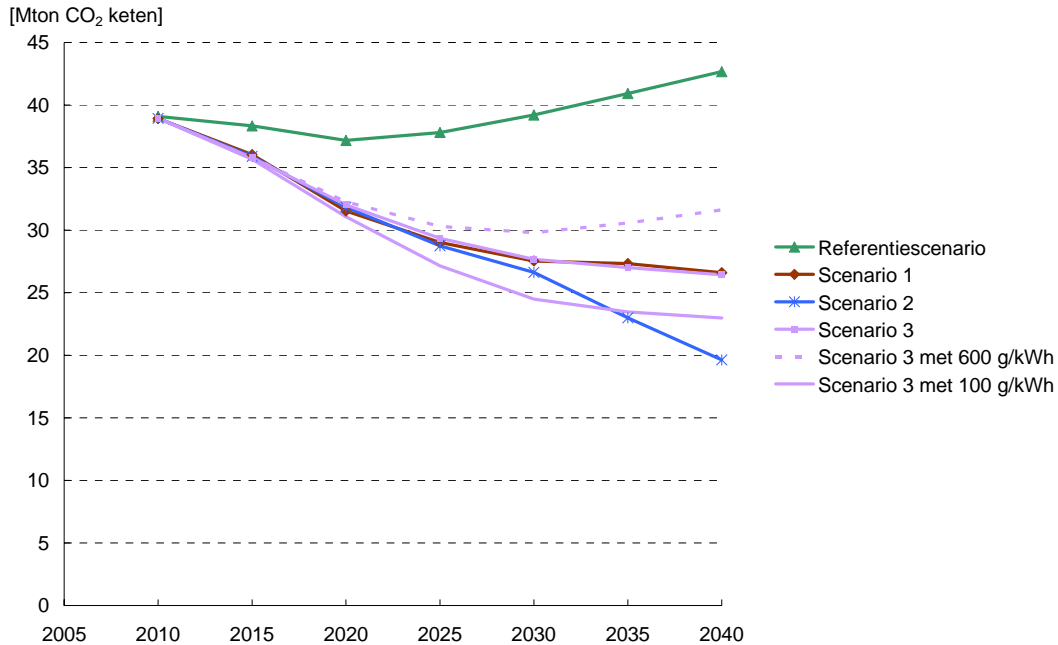
Het Laag scenario kan ook met behulp van diverse andere productieroutes behaald worden, bijvoorbeeld met een hoog aandeel van duurzame elektriciteitsproductie. Een emissiefactor van 0 g/kWh is in theorie wel mogelijk, maar lijkt in de praktijk nog verder weg te liggen dan 2040 en is hier niet bekeken. Tabel 6.1 vat de bovenstaande uitgangspunten voor de gevoeligheidsanalyse samen. De directe emissies zijn niet opgenomen (bedragen altijd 0).

²⁴ Zie bijvoorbeeld www.itm-project.nl.

Tabel 6.1 *Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse ketenemissiefactoren elektriciteit*

| CO ₂ -emissiefactor keten [g/kWh] | 2020 | 2030 | 2040 |
|---|------|------|------|
| Basis - gemiddeld productiepark | 500 | 400 | 300 |
| Laag - duurzaam (100% CCS) | 100 | 100 | 100 |
| Hoog - kolen (zonder CCS) | 600 | 600 | 600 |

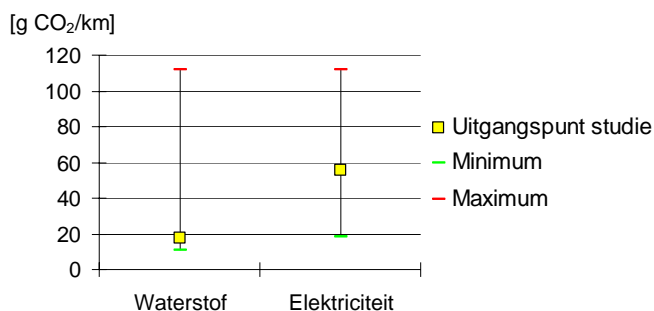
Figuur 6.5 toont hoe deze alternatieve uitgangspunten de ketenemissies van Scenario 3 voor het wegverkeer beïnvloeden.



Figuur 6.5 *CO₂-ketenemissie wegverkeer: gevoeligheidsanalyse emissiefactor elektriciteit*

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat voor het transitiepad elektrisch vervoer, de emissiefactor van elektriciteit zeer belangrijk is voor het uiteindelijke emissiereductie potentieel. Dit reductie potentieel in 2040 valt bij de alternatieve uitgangspunten of 3,5 Mton hoger uit, of 5 Mton lager. In het laatste geval blijft slechts 2,5 Mton over van het oorspronkelijke emissiereductie potentieel van elektrisch vervoer en plug-in hybrides. Als het elektrisch vervoer en de plug-in hybrides echter voornamelijk op duurzaam geproduceerde elektriciteit rijden, stijgt het reductiepotentieel tot 11 Mton ten opzichte van het referentiescenario.

Het reductiepotentieel blijft lager dat in Scenario 2 met waterstof behaald wordt. De reden hiervoor ligt bij het hoger veronderstelde marktaandeel van waterstof in het lichte voertuigenpark in Scenario 2 na 2030, zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2. In 2040 heeft Scenario 2 voor lichte voertuigen een marktaandeel van waterstof van 75% van de nieuw verkochte lichte voertuigen, bij Scenario 3 is het marktaandeel van all-electric beperkt tot rond de 40%. Figuur 6.6 toont dat bij de verduurzaming van de elektriciteitssector naar 100 g/kWh, de relatieve CO₂-ketenemissie per kilometer van elektrisch rijden vergelijkbaar is met rijden op waterstof. Bij een vergelijkbaar marktaandeel zou dan een vergelijkbare reductie met elektrisch vervoer gerealiseerd kunnen worden. Voor waterstof is als uitgangspunt een lagere emissiefactor verondersteld (dichter bij het minimum) omdat bij een sterk toenemende vraag vanuit de transportsector veel nieuwe productiecapaciteit zal worden gebouwd. Bij elektriciteit zal de toegenomen vraag ingevuld worden, afhankelijk van het laadmoment, waarbij niet te voorkomen is dat die deels vanuit bestaande (minder duurzame) centrales geleverd zal worden.



Figuur 6.6 *Vergelijking CO₂ ketenemissie per gereden km voor waterstof en elektriciteit*

Tabel 6.2 toont de maatschappelijke kosteneffectiviteit op basis van het reductiepotentieel bij een gemiddeld productiepark. De kosteneffectiviteit van elektrisch vervoer daalt pas rond 2030 naar circa € 300 per ton vermeden CO₂. Tot 2040 verbetert de kosteneffectiviteit verder tot ongeveer € 150 per ton. Deze daling is het resultaat van dalende meerkosten per voertuig en afnemende brandstofkosten. Door de extra kosten van een dubbele aandrijflijn bereiken plug-in hybrides pas rond 2040 een kosteneffectiviteit²⁵ van circa € 300 per ton vermeden CO₂. Indien de plug-in hybride van een veel kleinere verbrandingsmotor wordt voorzien (de elektromotor kan immers helpen bij zeer snel optrekken) wordt het kostenbeeld gunstiger.

Tabel 6.2 *Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - Elektrisch vervoer en plug-in hybride*

| | Elektrisch vervoer | | | Plug-in hybride | | |
|--|--------------------|---------|---------|-----------------|------|---------|
| | 2020 | 2030 | 2040 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Δ CO ₂ ketenemissie (Mton) | 0,3 | 2,0 | 4,9 | 0,4 | 1,6 | 2,5 |
| Δ Brandstofkosten (€ mld) | 0,0 | -0,2 | -0,3 | 0,0 | -0,2 | -0,2 |
| Δ Meerkosten Wagenpark (€ mld) | 0,3 | 0,8 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,0 |
| Δ Kosten - Totaal (€ mld) | 0,2 | 0,6 | 0,7 | 0,4 | 0,8 | 0,7 |
| Kosten-effectiviteit (€/ ton CO ₂) | >300 | 200-300 | 125-150 | >300 | >300 | 200-300 |

In geval van hogere fossiele brandstofprijzen conform de gevoeligheidsanalyse in Paragraaf 3.2.2 zal de kosteneffectiviteit van elektrisch vervoer tussen 2020 en 2040 verbeteren met € 75-100 per ton, via circa € 175 per ton in 2030 tot € 75 per ton in 2040. Voor plug-in hybrides verbetert de kosteneffectiviteit in vergelijkbare mate, om in 2040 een kosteneffectiviteit van circa € 225 per ton te bereiken.

6.3 Implicaties voor beleid

6.3.1 Uitdagingen

Voertuig

Voordat penetratie plaats kan vinden moeten elektrische voertuigen op de markt beschikbaar zijn. Voor een elektrisch voertuig zijn drie nieuwe zaken van belang: de elektromotor en de aandrijving, de accu en het verdere voertuigontwerp. Bij de technologische ontwikkeling van de accu liggen de uitdagingen op de volgende gebieden: prijs en levensduur, veiligheid en milieuaspecten, en de energiedichtheid en het gewicht. De energiedichtheid is direct gerelateerd aan de actieradius. Elektrische voertuigen en plug-in hybrides stellen overigens andere eisen aan de accu's dan hybride voertuigen, omdat het ontladingspatroon anders is.

²⁵ Het gaat hier om de maatschappelijke kosteneffectiviteit. Hierbij wordt geen rekening gehouden met subsidies en belastingen. Voor de eigenaar van het voertuig kan het financiële beeld er anders uitzien.

De kosten van het voertuig inclusief de accu zijn behoorlijk hoog, en dat blijft naar verwachting nog jaren zo. De elektriciteit is, vergeleken met conventionele brandstoffen met een hoge accijns, relatief goedkoop. Een toenemend aandeel elektrische voertuigen kan daarom wel gevolgen hebben voor de overheidsinkomsten, en mogelijk in de toekomst leiden tot een hogere accijns of belasting op elektriciteit.

Van belang is dat de typekeuring voldoende afgestemd worden op elektrische voertuigen. Omdat er al elektrische voertuigen rond rijden is dit in ieder geval al deels gebeurd. Wellicht dat de aspecten rond veiligheid nog wel extra aandacht vergen. Een accu kan bijvoorbeeld tussen de wielen in de veiligheidsconstructie van de auto geplaatst worden of half daarbuiten. In dit laatste geval is de kans op een zwaar beschadigde accu bij een botsing veel groter. Ook de accu zelf kan bij botsingen veiliger gemaakt worden. Er zijn bijvoorbeeld systemen die de accu afsluiten bij een botsing, zodat deze geen spanning meer kunnen leveren (vergelijkbaar met bijvoorbeeld airbags).

Ten aanzien van de geluidsproductie kan nog opgemerkt worden dat het relatief simpel is om een elektrische auto ten behoeve van slechthoorden extra geluid te laten maken (op zich maakt een elektrisch voertuig van zichzelf, onder andere via de banden, al wel voldoende geluid om hem te horen aankomen).

Infrastructuur

De aanleg van een infrastructuur met laadpunten kent ook de nodige uitdagingen. Behalve een ontwerp waar alle auto's op aangesloten kunnen worden, dient er ook de nodige regelgeving te komen rond de eigendomsverhoudingen van een openbaar netwerk en de toegankelijkheid voor de diverse aanbieders van elektriciteit. Vanzelfsprekend is het ook noodzakelijk dat ook buitenlandse voertuigen hier elektriciteit kunnen tanken en andersom. Een Europese standaard lijkt dan ook noodzakelijk. Voor de communicatie tussen voertuig, laadpunt elektriciteitsaanbieder kan verwezen worden naar mobiele telefoons; met een Nederlandse telefoon kan in het buitenland gebeld worden.

Het zal duidelijk zijn dat de lokale overheid een rol zal spelen bij het op grote schaal plaatsen van oplaadpunten (in Nederland gaat het over miljoenen). De rol van de overheid hierbij is om te voorkomen dat er lokaal onrealistische eisen gesteld worden of bepaalde gemeenten in het geheel geen medewerking willen verlenen. Veel gebruikers zullen namelijk afhankelijk zijn van laadpunten in de openbare ruimte.

Er zijn nog behoorlijke R&D-uitdagingen rond de inpassing in het elektriciteitsnet. Omdat de inzet van elektrische voertuigen aanzienlijk bij kan dragen aan de optimalisatie van elektriciteitscentrales in Nederland en bijvoorbeeld het gebruik van duurzame energie (wind) kan bevorderen kan het nuttig zijn om een instrument te ontwikkelen dat het mogelijk maakt dat centraal geregeld wordt welke auto opgeladen wordt op welk tijdstip²⁶. Dit kan, via een betere benutting van centrales en een betere inpassing van duurzame energie, een behoorlijke maatschappelijke winst opleveren.

Daarnaast kan het voorkomen dat er op één laadpunt keuze is uit meerdere aanbieders van elektriciteit, of dat er in een woning sprake is van verschillende leveranciers - één voor de thuisaansluiting voor de auto, die dit voertuig ook van elektriciteit voorziet in de openbare ruimte en één voor de rest van de elektriciteitsvraag). Ook hiervoor dienen de nodige maatregelen genomen worden. Zowel wat betreft de juridische scheiding van rekeningen etc., als de technische begeleiding. Er moet per oplading van een elektrische auto dus bijgehouden worden om hoeveel elektriciteit het gaat en de elektriciteitsleverancier moet de nodige informatie hebben over het

²⁶ Voor de elektriciteitsbedrijven kan dit betekenen dat de elektriciteitsprijs 's nachts hoger wordt, zodat de producenten hier meer kunnen verdienen. Dit geldt bijvoorbeeld ook voor warmte kracht koppeling in de industrie. Een deel van de winst wordt wellicht niet gerealiseerd omdat er meer aanbieders op de markt verschijnen. Omdat de vergoeding ook hoger wordt, vergt de stimulering voor duurzame energie minder geld van de overheid. Tenslotte zal de elektriciteitsprijs in het algemeen stijgen. Dit betekent dat verbruikers uiteindelijk de rekening betalen.

tijdstip van oplading. Het ligt voor de hand dat de gebruiker van de auto ook de mogelijkheid krijgt om aan te geven wanneer hij het voertuig weer in opgeladen toestand mee wil nemen.

Verder is er behoefte aan faciliteiten voor het wisselen van accu's of bijvoorbeeld voor het snel opladen. Vooral het snel opladen kan gevolgen hebben voor de elektriciteitsinfrastructuur.

Het op grotere schaal gebruiken van accu's, levert ook meer accu's op in de afvalstromen. Gezien de prijs van de accu's en de gunstige restwaarde, mag verwacht worden dat een de markt zich zelf gaat bezighouden met inzameling en verwerking. De rol van de overheid is hierbij die van vergunningverlener.

Voordeel van elektrische auto's is dat deze niet op olie rijden en dus de olieafhankelijkheid verminderen. Bovendien wordt elektriciteit gemaakt uit kolen, gas, kernenergie of duurzame energie. Per saldo betekent dit bij de huidige prijsstelling dat elektriciteit tot een toename van de importkosten voor voertuigen en accu's gaat leiden, maar ook tot een afname van de importkosten voor energiedragers. Ook zijn er voordelen op het gebied van luchtverontreiniging en (motor-)geluidsproductie. Naarmate door emissie-eisen motorvoertuigen schoner worden, neemt, zelfs als ook de elektriciteitscentrales steeds schoner worden, het emissievoordeel van elektrische auto's relatief gezien af.

6.3.2 Internationaal perspectief

De toepassing van hybride technologie, zal voor een belangrijk deel binnen Europa van de grond moeten komen via CO₂-normering van voertuigen (van zowel personen- als bestelauto's). Nederland kan zich internationaal inzetten voor scherpe normen. Het op de markt komen van plug-in voertuigen zal min of meer logische gevolg van zijn van de hybride technologie.

Ten aanzien van de elektrische voertuigen is er de nodige standaardisering nodig, bij voorkeur op internationaal niveau. Wellicht dat een aantal landen hiermee zullen beginnen (of al begonnen zijn). Wenselijk is dat hier een goede en voldoende bruikbare standaard uit komt. Wellicht dat Nederland hiervoor in een vroeg stadium over een standaard mee kan gaan denken. Hier ligt een rol voor de EU en bijvoorbeeld ACEA.

Voor het bereiken van de kostendalingen van de voertuigen en de accu's is het afzetvolume van belang (hoe groter het volume, hoe groter de kostendaling). Dit gaat veel verder dan alleen de Nederlandse markt. Ofwel, voor dit aspect is Nederland afhankelijk van het stimuleringsbeleid van de Europese Unie, of in ieder geval een aantal andere grotere EU-landen. Met eigen stimuleringsbeleid kan Nederland wel een bijdrage leveren.

6.3.3 Rol van de overheid

Er zijn voldoende motieven voor de overheid om het gebruik van elektrische voertuigen te stimuleren. Elektrische auto's dragen bij aan verbetering van de luchtkwaliteit, vermindering van de CO₂-emissies (tenzij in uitzonderlijke situaties) en het energiegebruik en een betere voorzieningszekerheid (lagere olieafhankelijkheid) van de energievoorziening. Elektrische voertuigen laten zich goed combineren met duurzame energie en passen goed in het lange termijn doel van een uit milieuoogpunt duurzame samenleving.

Op dit moment worden er in toenemende mate hybride auto's op de markt gebracht. Onder druk van gebruikers wordt ook gewerkt aan op de markt brengen van plug in hybride versies. De markt van elektrische voertuigen zou onderscheiden kunnen worden in luxe sportvoertuigen en bestaande modellen waar een elektrisch voertuig van gemaakt wordt. Er is in ieder geval één fabrikant die een nieuw model maakt dat zowel elektrisch als met een verbrandingsmotor kan worden uitgevoerd. Mede gezien de extra kosten van de accu is penetratie van dit soort voertuigen (enkele uitzonderingen daargelaten) direct afgelopen als ze onder hetzelfde belastingregime gebracht worden als voertuigen met alleen een verbrandingsmotor. De rol van de overheid zou

zich daarom primair op het realiseren van een toenemend afzetvolume kunnen richten. Uiteindelijk kunnen bepaalde auto-onderdelen, net als nu het geval is, in Nederland worden geproduceerd. Ook bij de recycling van het accumateriaal kan Nederland een belangrijke regionale rol spelen.

Ten aanzien van het opladen voertuigen is de situatie anders. Bij het realiseren van de oplaadpunten kan het Nederlands bedrijfsleven betrokken worden. Eventuele patenten kunnen wel veroorzaken dat marktpartijen niet zelf de ‘stopcontacten’ mogen maken. De interactie tussen het opladen van de voertuigen en het elektriciteitsnet biedt interessante marktmogelijkheid voor elektriciteitsleveranciers. Vanuit deze sector lopen er in binnen en buitenland diverse initiatieven. Zowel voor wat betreft alleen het opladen als voor de combinatie van het leasen van de accu en opladen. Het optimaal opladen van de voertuigen is op dit moment een grote R&D-uitdaging. Gezien het belang voor de energievoorziening is het logisch dat de overheid hierbij een rol speelt. Uiteindelijk zal ook de overheid hier beleidsmatig keuzes in moeten gaan maken, waarbij voldoende openbare kennis belangrijk is. Nederland kan hierbij als ‘early market’ fungeren.

Gezien de hoge prijs van elektrische voertuigen als gevolg van de hoge prijs van de accu's is het uitgesloten dat deze technologie zonder hulp van de overheid op grote schaal zal penetreren. Om de techniek aantrekkelijk te maken is productie op zeer grote schaal nodig. Nederland kan hier maar beperkt aan bijdragen. Het is wel zo dat de prijsstructuur van een elektrisch voertuig afwijkt van die van een gewone auto. Zo is de accu een belangrijke kostenpost. Als de overheid de accu op dezelfde manier zou gaan belasten als het gehele voertuig, wordt het voertuig waarschijnlijk zo duur dat het, zelfs op langere termijn, geen groot marktaandeel zal behalen.

Voor elektrische voertuigen is het op termijn van belang dat de belasting per voertuig niet hoger gaat worden als die op benzine en dieselvoertuigen. Omdat er veel minder heffingen bij bestelauto's zijn, kan het noodzakelijk zijn om hier zelfs met een investeringssubsidie te gaan werken.

Ook speelt de heffing op energiedragers een rol. Op dit moment kunnen elektrische voertuigen profiteren van een lagere energiekosten per kilometer, omdat de heffingen op benzine hoog zijn ten opzichte van elektriciteit. Ook hier kan de overheid door de heffingen gelijk te trekken een behoorlijke hinderpost voor elektrische voertuigen opwerpen.

Per saldo betekent dit dat elektrische voertuigen langdurige financiële stimulering nodig hebben en dat op termijn de belastingopbrengsten per voertuig zeker niet hoger moeten worden dan die van voertuigen op benzine en diesel. Daar staan dan wel maatschappelijke voordelen tegenover (zie eerste alinea van Paragraaf 6.3.3).

Elektrische voertuigen kunnen ook gestimuleerd worden via flankerend beleid, zoals milieuzoening of preferente parkeerplaatsen. Ook kan men wellicht via de CO₂-normering een stimulering van elektrische auto's veroorzaken, door een zekere CO₂-winst aan dit type voertuigen toe te kennen.

Ten aanzien van de elektriciteitsinfrastructuur is er een dubbele rol van de overheid. Voor de aanleg van de oplaadpunten is er gecoördineerd beleid nodig. Hier kunnen met gemeentes doel afspraken over worden gemaakt. Hoewel het om een substantieel bedrag gaat is de investering in de infrastructuur uiteindelijk veel lager dan die in de elektrische voertuigen. Wellicht dat de aanleg via de elektriciteitsdistributiebedrijven kan gebeuren. Voor de levering van de elektriciteit is er voor de overheid een rol weggelegd om hier voor voldoende toegankelijkheid en liberalisatie te zorgen.

7. Transitiepad energiebesparende ICT

7.1 Ontwikkelingsperspectief

Intelligente Transportsystemen (ITS) is een verzamelnaam voor diverse ICT-toepassingen in verkeer en vervoer, met het doel om de doorstroming, de verkeersveiligheid en het milieu te verbeteren. Bij de meeste van deze toepassingen staat doorstroming en veiligheid op de voorgrond. De netto milieu-effecten zijn niet per definitie positief, omdat een betere doorstroming ook meer mobiliteit uitlokt.

Korte termijn

De ITS-technologieën die op dit moment beschikbaar zijn, of waar aan gewerkt wordt, zijn in drie groepen in te delen (Van Arem et al., 2008).

- Onder de term verkeersmanagement vallen systemen zoals verkeerssignalering, snelheidsmaatregelen, toeritdosering en dynamische route informatiepanelen. Deze opties zijn grotendeels al beschikbaar en leiden tot een afname van de filedruk en van het aantal ongevallen. Van het invoeren en handhaven van snelheidslimieten kan een brandstofbesparing verwacht worden. In de komende 10-15 jaar kan met communicatie tussen voertuigen en wegbeheerders over incidenten, slecht weer, alternatieve routes, een verdere verbetering van de doorstroming bereikt worden.
- Verkeers- en reisinformatiesystemen: dit zijn systemen zoals navigatiesystemen en multimodale reisinformatie. Deze systemen verbeteren vooral de doorstroming, zeker als ze ook tijdens de reis waarschuwen voor incidenten en adviseren over alternatieve routes en modaliteiten. Navigatiesystemen hebben inmiddels een behoorlijk marktaandeel gekregen en hebben geen stimulans nodig.
- Rijtaakondersteunende systemen ondersteunen de bestuurder tijdens het rijden. Deze systemen zijn meestal gericht op een verbetering van de veiligheid, maar kunnen ook een milieu effect hebben. Er bestaan systemen die feedback geven aan de bestuurder, zoals *Speed alert*, en daarmee een rustiger en zuiniger rijstijl stimuleren. *Adaptive cruise control*, een systeem wat zorgt voor een veilige snelheid en afstand tot de voorligger, kan een brandstofbesparing van 5% tot gevolg hebben (Van Arem et al., 2008).

Een ander systeem wat met behulp van ICT een besparend effect kan hebben is het *tyre pressure monitoring system* (TPMS) wat in het voertuig wordt gebruikt om automobilisten te informeren over de bandenspanning en daarmee een stimulans biedt om de banden op correcte spanning te houden. Soms wordt onder energiebesparende ICT ook verstaan het bevorderen van telewerken, zodat het verkeersvolume afneemt. Dat valt buiten de scope van deze studie.

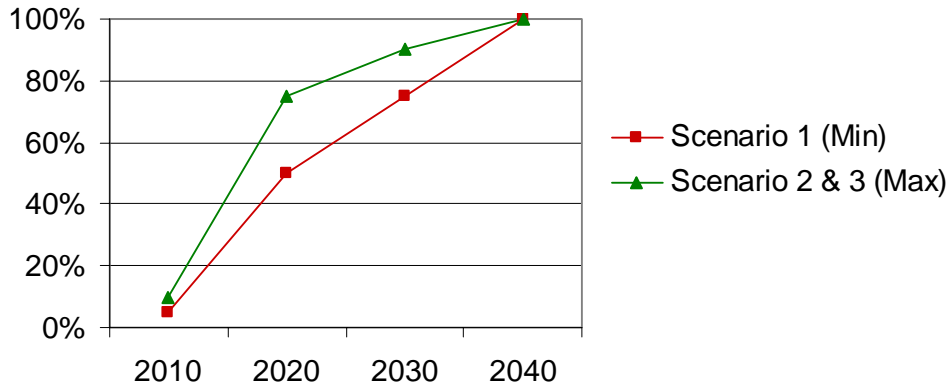
Lange termijn: vertreining

- Als de voertuigen onderling communiceren (*Cooperative adaptive cruise control*) kunnen er pelotons gevormd worden op speciale rijstroken. Deze technologie is nog in een experimenteel stadium. Voertuigen zullen niet alleen met afstandssensoren elkaar aftasten en op elkaar reageren, maar daarnaast ook samenwerken in de rijtaakondersteuning.
- Een ander ontwikkelingstraject is automatische voertuig geleiding op specifieke trajecten. Voertuigen kunnen in zo'n situatie dicht op elkaar rijden, wat de wegcapaciteit vergroot en het brandstofverbruik vermindert door lagere luchtweerstand.

Ontwikkelingsperspectief

Een aantal van de hierboven genoemde technologieën is al beschikbaar in het topsegment. Via de leasevloot kan het marktaandeel snel toenemen. Voor een grootschalige invoering van de ingrijpendere opties, waarbij ook sprake is van communicatie tussen voertuigen, is Europese coördinatie nodig. Daarom is verondersteld dat het marktaandeel van energiebesparende ICT in Scenario 2 sneller groeit dan in Scenario 1, zie Figuur 7.1.

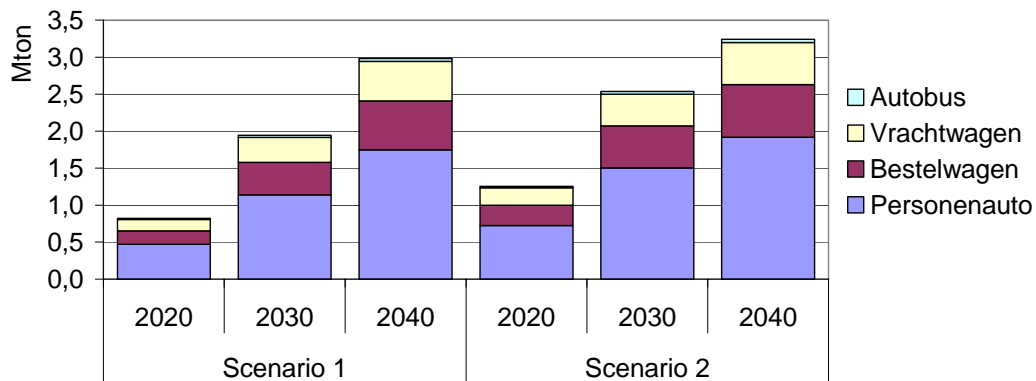
Gegeven de grote onzekerheden over zowel de effecten als de technologische ontwikkelingen is het effect van energiebesparende ICT op een geaggregeerde manier gemodelleerd. We verstaan onder energiebesparende ICT dan de rijtaakondersteunende systemen en in-car apparatuur op de kortere termijn, en de vertreining op de lange termijn. Het besparingseffect wordt ingeschat op maximaal 10% (Van Arem et al., 2008) bij een volledige penetratie voor personenauto's en bestelwagens. Voor vrachtwagens en autobussen wordt het potentieel wat lager ingeschat (5% respectievelijk 7,5%).



Figuur 7.1 Aandeel energiebesparende ICT in nieuwverkopen

7.2 Emissiereductie & kosteneffectiviteit

Het maximale reductiepotentieel van energiebesparende ICT groeit van ruim 1 Mton in 2020 naar ruim 3 Mton. Het effect van de snellere penetratie als gevolg van de sterkere Europese coördinatie is op lange termijn beperkt, 0,3 Mton (10%) in 2040. In 2020 en 2030 is dit verschil zowel in absolute zin (0,5 Mton) als in relatieve zin groter (50% tot 30%). Een versnelde penetratie van de nieuwe technologieën kan vooral bij het personenauto's een hogere emissiereductie veroorzaken, zie ook Figuur 7.2.



Figuur 7.2 CO₂-ketenemissiereductie potentieel energiebesparende ICT

Voor de meerkosten van het pakket van opties dat onder energiebesparende ICT valt is slechts een beperkt bedrag van € 500 per voertuig opgenomen. Hier worden geen dalende meerkosten aangenomen. Initieel zullen vooral de voertuiggerelateerde opties snel opkomen, en deze zullen op termijn wellicht goedkoper worden. Tegen die tijd zullen echter ook duurdere opties (met bijvoorbeeld aanpassingen aan de infrastructuur) penetreren, en deze prijsdaling compenseren.

Op basis van de aangenomen uitgangspunten, is energiebesparende ICT een zeer kosteneffectieve optie, zie Tabel 7.1. De kosteneffectiviteit is negatief, wat inhoudt dat de besparing in brandstofkosten, de meerkosten voor het wagenpark overtreffen. In geval van een hogere fossiele brandstofprijs zal de kosteneffectiviteit nog verder verbeteren.

Tabel 7.1 *Kosteneffectiviteit CO₂-ketenemissies - Energiebesparende ICT*

| | Scenario 1 | | | Scenario 2 | | |
|--|------------|------|------|------------|------|------|
| | 2020 | 2030 | 2040 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Δ CO ₂ ketenemissie (Mton) | 0,8 | 2,0 | 3,0 | 1,3 | 2,5 | 3,3 |
| Δ Brandstofkosten (€ mld) | -0,1 | -0,4 | -0,6 | -0,2 | -0,5 | -0,6 |
| Δ Meerkosten Wagenpark (€ mld) | 0,1 | 0,3 | 0,4 | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
| Δ Kosten - Totaal (€ mld) | 0,0 | -0,1 | -0,2 | -0,1 | -0,1 | -0,2 |
| Kosten-effectiviteit (€/ ton CO ₂) | <0 | <0 | <0 | <0 | <0 | <0 |

7.3 Implicaties voor beleid

7.3.1 Uitdagingen

De meeste rijtaakondersteunende systemen kunnen in nieuwe auto's met on-board computers ingebouwd worden. De technologie is in principe beschikbaar en, zeker voor het topsegment, betaalbaar. Vaak is er een GPS ontvanger nodig voor het bepalen van de (maximum)snelheid, en sensoren voor het bepalen van de afstand tot de voorganger.

Belangrijk is verder de ontwikkeling van internationale standaarden voor communicatie tussen voertuigen onderling en met hun omgeving; dit vergt Europese coördinatie. Er zal ook een communicatie infrastructuur langs (snel-)wegen aangelegd moeten worden. Dit vergt coördinatie vanuit de Nederlandse overheid.

Op de lange termijn zal de acceptatie van systemen die controle over het voertuig overnemen van de chauffeur, of extern ingrijpen op de snelheid een barrière zijn. Gerelateerd hieraan zijn er nog diverse juridische barrières. Hoe wordt omgegaan met aansprakelijkheid voor een incident als gevolg van een computerprobleem?

7.3.2 Internationaal perspectief

De ontwikkeling van ITS is sinds de jaren '90 van de vorige eeuw gestimuleerd in omvangrijke Europese R&D-programma's. Het is de verwachting dat de technologische ontwikkelingen verder zullen gaan. Er is geen Europese wetgeving die specifiek inzet op het bevorderen van ITS ten behoeve van het schoon en zuinig rijden. In hoeverre ITS hiervoor toegepast zal worden, zal onder meer afhangen van de ambities van de Europese CO₂-normering. De Nederlandse overheid loopt Europees voorop in het invoeren van de kilometerbeprijzing. Dit biedt kansen voor ITS, en andersom heeft Nederland, als dichtbevolkt land, ook belang bij een verdere ontwikkeling van ITS-opties die de doorstroming en veiligheid bevorderen.

Nederland heeft internationaal een sterke positie op het gebied van hightech systemen en materialen. Het innovatieprogramma HTAS (High Tech Automotive Systems) (TWA, 2008), richt zich daarom, met ondersteuning van het Ministerie van Economische Zaken, onder meer op begeleidings- en informatiesystemen voor mobiliteit. Onderzoek op dit gebied wordt uitgevoerd door TNO en diverse marktpartijen.

7.3.3 Rol van de overheid

Bij de ontwikkeling en invoering van ITS zijn veel verschillende actoren betrokken, zoals de ICT sector, de automobielandustrie, aanbieders van informatiediensten, wagenparkbeheerders, wegbeheerders en de overheid. Een belangrijke actor is ook de bestuurder, die niet alleen gemotiveerd moet zijn om een ITS-systeem aan te schaffen, maar ook om het te (blijven) gebruiken. De overheid heeft verschillende manieren tot haar beschikking om de ontwikkeling van ITS systemen te stimuleren. Voor de rijtaakondersteunende en in-car apparatuur die technisch al beschikbaar is of binnenkort komt, zal de overheid een stimulerende rol kunnen vervullen. Naar verwachting zullen deze systemen in duurdere auto's al als luxe optie worden aangeboden, en is er ook vraag naar, omdat ze voor een bestuurder ook aantrekkelijk zijn uit het oogpunt van rijcomfort. Aan de technologische ontwikkeling in de richting van vertreining, kan de overheid bijdragen op diverse fronten, zoals hieronder verder uitgewerkt.

Korte termijn: rijtaakondersteuning en informatie

Marktpenetratie zou kunnen verlopen via pilots bij leasemaatschappijen. De beschikbaarheid van opties als speed alert, TPMS of adaptive cruise control op alle modellen nieuwe auto's kan alleen Europees geregeld worden. Vervolgens kan dan een Nederlandse verplichting of subsidie overwogen worden. Deze systemen kunnen ook gepropageerd worden in het kader van het programma Het Nieuwe Rijden, omdat ze een zuinige rijstijl ondersteunen.

Er is waarschijnlijk een overlap met de functionaliteit van de on-board unit die nodig is voor de kilometerbeprijzing. Daarom zou, om lock-in situaties te voorkomen, bij het invoeren hiervan rekening gehouden moeten worden met de eisen die op de langere termijn aan deze unit gesteld worden.

Lange termijn: vertreining

Om *cooperative adaptive cruise control* en soortgelijke ontwikkelingen binnen bereik te brengen, kan de overheid op verschillende fronten ondersteuning bieden. Allereerst zal de technologische ontwikkeling gebaat zijn bij R&D-ondersteuning, demonstratieprojecten en veldtesten. Daarnaast is er een rol voor de overheid in het gecoördineerd Europees standaardiseren van communicatie frequenties, en het scheppen van een juridisch kader met betrekking tot aansprakelijkheid. Als wegbeheerder heeft de overheid ook een rol in het opzetten van de communicatie-infrastructuur tussen voertuig en de 'wegkant'. Als laatste is gebruikersacceptatie een aandachtspunt.

8. Rijden op aardgas in transitieperspectief

8.1 Inleiding

Het gebruik van aardgas in de vorm van Compressed Natural Gas (CNG) als transportbrandstof wordt in Nederland door overheid en marktpartijen gestimuleerd. CNG wordt daarbij vaak gezien als een transitietechnologie, die de weg kan bereiden voor groen gas of waterstof. Dit hoofdstuk bespreekt deze argumentatie in meer detail en geeft een kort overzicht van de mogelijke bijdrage van CNG aan beleidsdoelen op het gebied van klimaat, milieu en voorzieningszekerheid. Ook aan Liquefied Natural Gas (LNG) wordt aandacht besteed.

De belangrijkste voordelen van CNG zijn als volgt.

- CNG verbetert de lokale luchtkwaliteit vanwege de lagere uitstoot van PM₁₀ (fijn stof) en NO_x. Bij zware voertuigen, zoals bussen en vrachtwagens voor (stedelijke) distributie, kan overschakeling naar CNG op dit moment een substantiële verbetering van de luchtkwaliteit bewerkstelligen, juist op knelpunten zoals in binnensteden, met name voor wat betreft de NO_x-emissies (en NO₂-concentraties). Voor lichte voertuigen is het voordeel minder groot, omdat via katalysatoren en roetfilters recentelijk ook bij benzine- en dieselveertuigen al veel verbetering bereikt is²⁷. In de toekomst wordt het verschil nog kleiner. Een CNG personenauto heeft nauwelijks nog een voorsprong ten opzichte van de EURO-6 normen die vanaf 2014 verplicht zijn voor nieuwe auto's (Verbeek, 2008).
- CNG heeft een beperkt CO₂-voordeel. De uitstoot van een aardgasauto is 15-20% lager²⁸ dan die van een benzineauto en 5% lager dan die van een dieselauto. Het is belangrijk om op te merken dat CNG auto's niet zuiniger zijn dan benzineauto's, ze maken alleen gebruik van een brandstof met minder koolstof.
- CNG kan helpen de import afhankelijkheid van olie te verminderen.
- CNG voertuigen hebben lagere geluidsemissies.

De belangrijkste nadelen van CNG zijn:

- De hogere aanschafkosten van het voertuig. Een CNG personenauto is op dit moment € 2000 - 4000 duurder dan een benzine-auto²⁹, bussen en andere zware voertuigen kosten 10-15% meer dan een dieselveertuig. Ook de onderhoudskosten zijn iets hoger dan die van een dieselveertuig.
- Het gewicht van de brandstoftanks, en bij bi-fuel auto's, de extra ruimte die nodig is voor de tanks, hoewel deze onder de vloer van de auto verwerkt kunnen worden.
- Een beperkte actieradius: ongeveer 300 km op CNG met een bi-fuel personenauto; 500 km voor een mono-fuel aardgasauto.
- Het (nog) ontbreken van een landelijk dekkend netwerk van vulstations. Voor nichemarkten, zoals het openbaar busvervoer, geldt dit bezwaar niet en kan vaak volstaan worden met een centraal vulpunt.

²⁷ Volgens TNO hebben EURO 3 voertuigen op CNG een veel betere milieuprestatie dan benzine voertuigen: NO_x 60% beter, PM10 70% beter en koolwaterstoffen (HC) 15% beter (Verbeek, 2008, pag. 79). De emissie-eisen in EURO 6, die voor benzine en diesel dicht bij elkaar liggen, komen bij benzinevoertuigen op 40% van het EURO 3 niveau uit bij NO_x en op 50% bij HC. Bij diesel gaat de PM10 eis in gram per testrit zelfs naar 16% van het EURO 3 niveau. Uit de aanscherping zou geconcludeerd kunnen worden dat het voordeel bij NO_x en HC zou kunnen verdwijnen. TNO verwacht dat CNG-auto's de EURO 6 eisen gaan halen (pag 133), en dat de verschillen in emissies van CNG-voertuigen ten opzichte van benzine en diesel voertuigen zullen afnemen. Wel verwacht TNO een klein voordeel voor CNG bij de stoffen die nu nog niet gereguleerd worden.

²⁸ Lopend onderzoek van TNO geeft de indicatie dat het CO₂-effect mogelijk nog kleiner is, omdat aardgasauto's een hoger energieverbruik hebben (Passier, 2008b).

²⁹ Ten opzichte van een diesel-auto zijn de meerkosten € 0-2000. Het verschil hangt af van de prijsstelling van de fabrikant en de Nederlandse BPM.

Een lange termijn overweging is de beschikbaarheid en betaalbaarheid van aardgas. De verhouding tussen de Nederlandse aardgasreserve en de productie (de R/P-ratio) was eind 2007 nog 19 (jaar) (wat betekent dat de Nederlandse gasvoorraden, bij het huidige productieniveau, voor 2030 uitgeput zullen zijn). In het Energierapport 2008 geeft de overheid aan dat aardgas naar verwachting ook nadat Nederland een gasimporteur is geworden, een belangrijke energiedrager blijft. De overheid ziet ook kansen voor de Nederlandse economie middels de gasronde. Wereldwijd is er meer aardgas dan olie beschikbaar. De R/P-ratio is voor olie ca. 40 en voor aardgas 63 (BP, 2008). De belangrijkste aardgasvoorraden bevinden zich in Rusland, Iran, Qatar en Algerije.

8.2 Huidige stimulering

Rijden op aardgas is betrekkelijk goedkoop, omdat de energiebelasting op aardgas als brandstof veel lager is dan de accijns op diesel of benzine. CNG kost aan de pomp 0,69 €/kg, dit is qua energie-inhoud en actieradius te vergelijken met 1,18 €/l voor diesel³⁰. Uit Tabel 8.1 blijkt dat het prijsverschil vooral door de lagere belasting veroorzaakt wordt. Bij een groeiend marktaandeel kan het moment komen dat de inkomstenderving van de overheid te groot wordt en het belastingvoordeel niet meer houdbaar is. Het is zaak om bij consumenten en bedrijven in dit opzicht reële verwachtingen te scheppen. Het is wel zo dat de overheid, door de hogere cataloguswaarde van CNG auto's, ook iets meer BPM inkomsten heeft³¹.

Tabel 8.1 *Prijs en prijsopbouw CNG en diesel*

| | Recente prijs | | Uitgedrukt per energie-eenheid [€/GJ] | | |
|--------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------|
| | Recente pompprijs | Recente pompprijs | Waarvan | | Kale prijs |
| | | | Waarvan BTW | energiebelasting/accijns | |
| Diesel | 1,18 €/l | 32,9 €/GJ | 5,3 | 11,5 | 16,1 |
| CNG | 0,69 €/kg | 18,1 €/GJ | 2,9 | 1,0 | 14,2 |

Nieuwe personenwagens met een al in de fabriek geïnstalleerde aardgas- of LPG-installatie krijgen sinds augustus 2008 een herzien energielabel, en geven daarmee recht op een BPM-korting. Tot voor kort werden dergelijke modellen afgerekend op de CO₂-uitstoot met benzine als brandstof, terwijl auto's op aardgas en LPG minder CO₂ uitstoten.

Op dit moment zijn er 17 aardgas vulstations gerealiseerd. De provincies werken aan een landelijk dekkend netwerk van 120 aardgastankstations in 2011 (www.fuelswitch.nl)³². Er zijn subsidies beschikbaar uit de ministeriële subsidieregeling Alternatieve Brandstoffen, en diverse provincies stellen aanvullende subsidies ter beschikking. Daarnaast wordt er geïnvesteerd in informatiecampagnes gericht op consumenten en bedrijven.

8.3 Aardgas als voorloper voor groen gas

Aardgas kan beschouwd worden als een voorloper van het toepassen van groen gas als transportbrandstof. Daarbij is sprake van meerdere onzekerheden. Allereerst hangt het potentieel van groen gas af van de hoeveelheid beschikbare en duurzaam geproduceerde biomassa, en is er sprake van concurrentie met andere toepassingen van biomassa. Groen gas kan verkregen worden via twee verschillende hoofdroutes: biogas en SNG.

³⁰ Bron: www.fuelswitch.nl, prijsniveau 12 november 2008.

³¹ Dit is niet meer het geval als de BPM een CO₂ grondslag krijgt.

³² Het bedrijf CNGnet heeft zichzelf tot doel gesteld om 250 tankstations te bouwen in de komende drie jaar (www.cngnet.nl).

- Biogas is een vergistingproduct, en per definitie gasvormig. Het wordt gewonnen uit afvalstromen zoals mest, rioolslib, reststoffen uit de voedingsmiddelen industrie en dergelijke. Doorgaans zijn dit projecten waarbij lokaal of regionaal beschikbare biomassa wordt ingezet. Vanwege de hoge eisen aan de kwaliteit van gas als motorbrandstof, moet biogas uit een vergistinginstallatie eerst nog worden opgewerkt. Op dit moment wordt biogas als brandstof gebruikt om, al dan niet in WKK installaties, duurzame elektriciteit te produceren of wordt het na opwerking aan het aardgasnet geleverd.
- SNG (synthetic natural gas) wordt geproduceerd via vergassing van houtachtige biomassa. Opgemerkt wordt dat deze biomassa ook via het Fischer Tropsch proces omgezet kan worden in een dieselbrandstof, die zonder motoraanpassingen in moderne auto's gebruikt kan worden. Het rendement van FT diesel productie is echter lager dan dat van SNG productie, waardoor het laatste waarschijnlijk goedkoper uitvalt (Biollaz & Stucki, 2004).³³ Beide technologieën zijn overigens nog in de demonstratiefase. Voor SNG geldt dezelfde discussie rond duurzaamheid en concurrentie met de voedselvoorziening als voor vloeibare biobrandstoffen.

Wat is het potentieel van groen gas? Opnieuw valt dit uiteen in twee onderdelen, het potentieel voor biogas en dat voor SNG.

- Het theoretisch maximale potentieel van biogas uit natte reststromen in Nederland is naar schatting 45-50 PJ (Platform Nieuw Gas, 2007); ofwel ongeveer 10% van de energievraag van het Nederlandse wegverkeer; deze was 450 PJ in 2005. Er zijn wellicht additionele potentiëlen uit voedselresten, energieteelt of landbouwafval, hoewel veel landbouwafval geschikter is voor omzetting in 2^e generatie ethanol vanwege het hoge cellulosegehalte. In het algemeen is het moeilijk om potentiëlen te schatten op basis van beschikbaarheid van reststromen. Deze beschikbaarheid is afhankelijk van zowel ontwikkelingen in de vraag naar het hoofdproduct waar het residu bij vrijkomt, en ontwikkelingen in concurrerende vraag naar het residu. Beide kunnen snel veranderen. Nader onderzoek zou meer informatie kunnen verschaffen over de markten voor residuen, de rendementen waarmee de reststoffen kunnen worden omgezet in biogas, en de toepassingen waarmee geconcurrereerd wordt.
- Het potentieel voor SNG hangt sterk af van de beschikbaarheid van houtachtige biomassa. Deze zal grotendeels uit het buitenland moeten komen. Het Platform Nieuw Gas (2007) heeft een ambitie van 15-20% groen gas in 2030 en gaat daarbij uit van 240 PJ aan SNG, ofwel ongeveer de helft van de energievraag van het Nederlandse wegverkeer. Gesteld wordt dat hiervoor jaarlijks ongeveer 20 miljoen ton biomassa moet worden geïmporteerd, die uiteraard moet voldoen aan de door de overheid geformuleerde duurzaamheidscriteria. Verwacht wordt dat in de komende jaren de Europese en mondiale vraag naar biomassa enorm zal groeien, wat onzekerheid rond beschikbaarheid en betaalbaarheid van deze biomassa oplevert.

Naast mobiliteit zijn er andere toepassingen voor groen gas. Het is goed toepasbaar in de gebouwde omgeving (gasvraag ongeveer 300 PJ), waar het bijgemengd kan worden in het bestaande gasnet. Verder is groen gas bruikbaar in de chemische industrie en voor de elektriciteitsvoorziening waar het een belangrijke vergroening kan betekenen voor het flexibele vermogen. Het is niet nodig om groen gas daadwerkelijk in een voertuig te gebruiken. Een certificatiesysteem kan waarborgen dat een afnemer die CNG tankt, dezelfde hoeveelheid groen gas afneemt die elders in het aardgasnet is ingevoerd³⁴. Een systeem vergelijkbaar met de certificaten voor groene stroom.

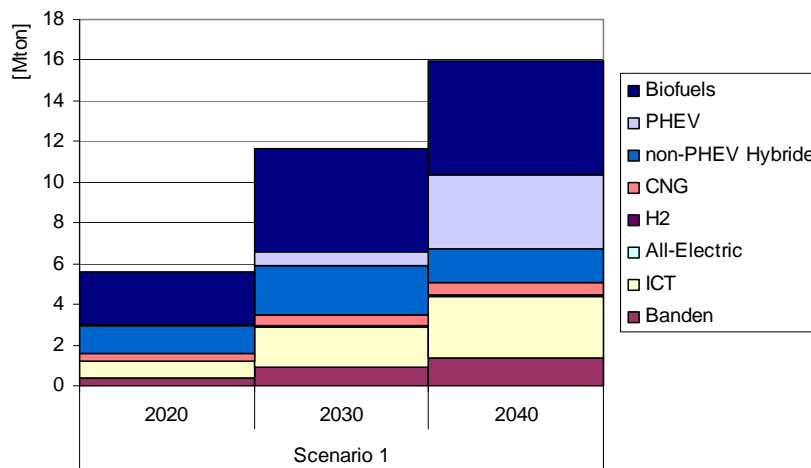
In plaats van CNG kan ook vloeibaar gemaakt aardgas gebruikt worden. Voordeel van LNG is dat dit een hogere energiedichtheid heeft dan CNG, nadeel dat dit op zeer lage temperatuur gehouden moet worden (-163 °C). Gezien deze eigenschappen kan LNG als brandstof gebruikt worden voor zware voertuigen met een hoge bedrijfstijd (dit gebeurt onder meer in de VS) en

³³ Installaties die beide produceren kunnen voor FT diesel een veel gunstiger rendement bereiken.

³⁴ Binnen de transportsector zijn er overigens ook al andere systemen in gebruik om klimaatneutraal te kunnen reizen, zie www.klimaatcompensatie.nl voor een overzicht van aanbieders, die compensatie verlenen door investering in duurzame energie projecten of aanplant van bomen.

binnenvaartschepen. Het maken van LNG kost meer energie dan CNG compressie. Als er eenmaal LNG is (omdat dit per schip over zee is aangevoerd) kan het gunstig zijn om dit als LNG met tankauto's naar het tankstation te vervoeren en daar eventueel in CNG om te zetten. Of dit in de praktijk ook gaat gebeuren hangt ook af van kosten en bijvoorbeeld veiligheid. Ook biogas zou als LBG getransporteerd kunnen worden (Sundsfall, 2008). Omdat dit nog in de kinderschoenen staat, is er nog geen goed beeld van voor- en nadelen, haalbare rendementen en kosten.

ECN heeft in (Uyterlinde et al, 2008) twee innovatiescenario's voor het wegverkeer doorgerekend waaraan in dit rapport een derde (elektriciteit)scenario is toegevoegd. In scenario 1 ontbreekt een sterke Europese coördinatie in het innovatiebeleid, wat er toe leidt dat Nederland kiest voor CNG als voorloper voor biogas, naast een forse inzet van biobrandstoffen en hybride auto's. Aangenomen is dat het aandeel CNG voertuigen in de nieuw-verkopen in 2020 groeit naar plusminus 10% voor personen- en bestelauto's, en ruim 20% voor bussen. In 2030 stabiliseert het aandeel nieuw-verkopen zich rond respectievelijk 15% en 30%, dit correspondeert met een CNG inzet van ongeveer 40 PJ. Figuur 8.1 geeft de CO₂ emissiereductie weer van dit scenario, onderverdeeld naar optie. De emissiereductie als gevolg van inzet van CNG is, zoals verwacht, beperkt: 0,35 Mton in 2020. Een gevoeligheidsanalyse wijst uit dat het vervangen van CNG door biogas in 2030 ongeveer 2,2 Mton extra ketenemissies kan reduceren. Echter, omdat de totale hoeveelheid beschikbare biomassa beperkt is, kan dit wel ten koste gaan van inzet van vloeibare biobrandstoffen of biomassa in andere sectoren, waardoor het totale CO₂-effect naar verwachting gelijk blijft.



Figuur 8.1 Well-to-wheel CO₂-emissiereductie in Scenario 1

8.4 Aardgas als voorloper voor waterstof in brandstofcelvoertuigen

Hoewel CNG en waterstof beide gasvormige energiedragers zijn, is er een aantal belangrijke verschillen tussen productie, distributie, en type aandrijving in de auto.

- Bij CNG wordt aardgas uit het net lokaal gecompriemd tot 200 bar en in tanks opgeslagen tot er een voertuig komt tanken. Deze CNG-tanks zijn niet geschikt voor de opslag van waterstof, waar een druk van 700 bar nodig is. Bovendien is het niet toegestaan om tanks die zijn ontworpen en gecertificeerd voor een bepaald gas, te gebruiken voor een ander gas, en stelt het kleine waterstof molecuul extra eisen aan het materiaal om waterstofbroosheid (een soort corrosie) te voorkomen.
- Een van de duurste componenten van een CNG-vulpunt is de compressor, en deze kan niet hergebruikt worden voor waterstof. Bovendien is de verwachting dat waterstof in eerste instantie, bij het ontbreken van een pijpleiding, vooral in vloeibare vorm aangevoerd zal wor-

den. Omdat de druk verschilt (en om fouten te voorkomen) zijn zaken als vulpistolen, vulslangen en volume meetapparatuur ook niet voor beide te gebruiken.

- Waterstof in brandstofcelvoertuigen moet heel zuiver zijn, rijden op een mengsel van waterstof en aardgas is niet mogelijk³⁵.
- In de beleving van een bestuurder is de overstap van een verbrandingsmotor naar een brandstofcelauto groot. Dit wordt maar zeer beperkt kleiner als men al CNG of LPG gereden heeft en gewend is een brandstof onder druk te tanken.

Conclusie is dat rijden met aardgasvoertuigen geen noemenswaardige bijdrage levert aan de transitie naar brandstofcelvoertuigen op waterstof. Het is echt een andere weg en zeker geen tussenstap.

8.5 Zijn er kostendalingen te verwachten?

Rijden op aardgas is technisch gezien net zo volwaardig als rijden op benzine of diesel. Er is al decennia ervaring mee in Italië en meer recent in de Duitsland en de VS. Een aardgasauto heeft een verbrandingsmotor met vonkontsteking, en is vergelijkbaar met een benzineauto met een ander opslag- en aanvoersysteem voor de brandstof. Grote kostendalingen, zoals bij elektrisch rijden en waterstof zijn daarom niet meer te verwachten. Wel komen technische verbeteringen bij benzineauto's, zoals zuinigere verbrandingsmotoren, ook ten goede aan CNG auto's. Daarnaast wordt er gewerkt aan innovaties specifiek voor CNG zoals lichtgewicht opslagtanks, nieuwe opslagmaterialen en efficiëntere compressoren.

Wellicht kunnen de marktprijzen voor CNG voertuigen nog wat dalen als er meer afzetmogelijkheden voor zijn. Naar verwachting blijven bi-fuel auto's (die ook op benzine kunnen rijden) altijd iets duurder dan benzinevoertuigen vanwege de extra functionaliteit.

Het is duur om nieuwe aardgasvulpunten aan te leggen, voornamelijk door de benodigde compressor. Kosten voor een aardgasvulpunt zijn € 300.000, terwijl de kosten van een vulpunt voor vloeibare biobrandstoffen rond de € 35.000 liggen (bron: 100.000 voertuigenplan, 2008). Voor de compressor geldt dat het een bestaande technologie betreft, waarvoor geen substantiële kostendalingen verwacht kunnen worden als gevolg van een grootschalige implementatie.

Er zijn, tot slot, geen spillovers te verwachten van de ervaring van aanleggen van aardgas vulstations voor een te bouwen waterstof infrastructuur. Zoals eerder vermeld, zal de distributie van waterstof waarschijnlijk in eerste instantie, net als bij LNG, via tankwagens gaan. Bovendien zijn er technisch gezien diverse verschillen (benodigde druk, materialen). In Italië is op dit moment al een netwerk van aardgastankstations. Ook in Duitsland is de afgelopen jaren veel in tankstations geïnvesteerd, waardoor er in Europa al ruime ervaring is op dit gebied.

8.6 Conclusies

Wat is de bijdrage van CNG aan beleidsdoelen op het gebied van klimaat, milieu en voorzieningszekerheid, en in hoeverre draagt CNG bij aan een transitie naar biogas of waterstof?

Effectiviteit

De overheid heeft in Schoon en Zuinig voor de sector verkeer een vervoer een *klimaatdoelstelling* vastgesteld van 13-17 Mton CO₂ emissiereductie in 2020. De bijdrage van CNG aan het behalen van die doelstelling is zeer beperkt. Dit is een direct gevolg van het feit dat aardgas een fossiele brandstof is met een lager koolstofgehalte dan olie, en dat de brandstof in de auto ver-

³⁵ Het bijmengen van waterstof in het aardgasnet valt buiten de scope van dit rapport. Distributie van waterstof via het bestaande aardgasnet is problematisch vanwege twee redenen. Ten eerste is de lektheid van het aardgasnet een probleem, waterstof diffundeert makkelijker door de leidingen dan aardgas. Ten tweede heeft waterstof een veel lagere energiedichtheid dan aardgas. Om bij dezelfde druk een zelfde hoeveelheid energie te kunnen transporten zijn daarom leidingen nodig met een grotere diameter.

brand wordt. Op korte termijn is het voordeel van rijden op aardgas dat de technologie al beschikbaar is.

Op lange termijn is het belangrijk om een traject in te zetten naar brandstoffen met zeer lage koolstofgehaltes (tweede generatie biobrandstoffen, groen gas), of naar secundaire energiedragers (elektriciteit, waterstof). Zoals hierboven besproken, draagt het nu opzetten van een aardgasketen in verkeer en vervoer niet bij aan een transitie naar waterstof in brandstofcelvoertuigen. Rijden op aardgas kan wel een rol spelen in een transitie naar groen gas, zeker voor zover het biogas uit vergisting van reststromen betreft, omdat dat in gasvormige toestand beschikbaar komt. Het potentieel daarvoor zou rond de 10% van de energievraag van het wegverkeer kunnen dekken, mits niet voor andere sectoren ingezet. Het potentieel voor SNG is sterk afhankelijk van geïmporteerde biomassa, waarvoor dezelfde duurzaamheidsdiscussie geldt als voor vloeibare biobrandstof (FT-diesel). Voor FT diesel zijn geen aanpassingen aan tankstations nodig.

Voor benzine-auto's is het rijden op groen gas eventueel een alternatief voor (tweede generatie) bio-ethanol. Hier is een afweging nodig van de termijn waarop beide brandstoffen in voldoende mate beschikbaar komen op de markt. De investeringen in E85 vulpunten en -auto's zijn overigens veel geringer dan die in de CNG keten. In Hoofdstuk 10 wordt de aanbeveling gedaan om de ontwikkeling van tweede generatie dieselvangers prioriteit te geven boven bio-ethanol, omdat er voor het vrachtverkeer minder CO₂-arme technologieën beschikbaar zijn dan voor het personenverkeer. Aardgas kan ook als LNG ingezet worden in het vrachtverkeer, maar er is dan op dit moment van CO₂-reductie waarschijnlijk nauwelijks sprake³⁶, behalve als het gas uit biomassa geproduceerd wordt. Het is ook nog niet duidelijk of de inzet van groen gas via de certificatenroute, of inzet met aparte distributie (leidingen of in vloeibare vorm per tankwagen) de voorkeur verdient. Uit de scenario-analyse (zie Hoofdstuk 3) in combinatie met de beschouwde potentiële blijkt overigens dat de huidige verwachting is dat CNG/biogas slechts een beperkt marktaandeel zal krijgen en om die reden ook een beperkt CO₂ effect heeft. Voor waterstof en / of elektrisch rijden zijn de verwachte marktaandelen - mits de technologie succesvol doorontwikkeld wordt - veel groter.

Voor de *luchtkwaliteitsdoelen* geldt dat rijden op aardgas in eerste instantie een belangrijke bijdrage kan leveren aan verbeterde luchtkwaliteit. Dit is met name het geval voor het stedelijk busvervoer en goederendistributie. Met de aanscherping van de EURO normen neemt het luchtkwaliteitsargument in belang af, en rond 2015 zal het extra milieuvoordeel van nieuwe CNG voertuigen ten opzichte van conventionele brandstoffen veel kleiner zijn.

Voor doelen rond *voorzieningszekerheid* geldt dat CNG zeker bijdraagt aan een brandstof diversificatie in de transportsector. Het voordeel is dat de technologie op dit moment al beschikbaar is. Op korte termijn kan dat gunstig zijn voor de importafhankelijkheid, op lange termijn (2030) zal Nederland ook het gas moeten importeren, waarbij Nederland verwacht met de gasronde een belangrijke internationale rol te spelen³⁷. Als ook op de lange termijn, een bijdrage van aardgas in de transportsector uit dit oogpunt te overwegen is, dan hoeft dit niet via CNG te zijn. Rijden op elektriciteit of waterstof uit aardgas is uit klimaat- en luchtkwaliteitsoogpunt aantrekkelijker, omdat centrale productie de mogelijkheid geeft om CO₂ af te vangen en op te slaan, en vanwege de grotere efficiency van de elektrische motor of de brandstofcel. Bovendien bieden deze energiedragers een mogelijkheid tot verdere diversificatie omdat ze uit meerdere (duurzame) bronnen te maken zijn.

Efficiency

Is de introductie van CNG, en op termijn groen gas, een kosteneffectieve manier om bij te dragen aan klimaat-, milieu- en voorzieningszekerheidsdoelen? Deze vraag heeft vele facetten.

³⁶ Er zijn op dit moment wel concepten in de testfase om het rendementsverschil tussen zware motoren op CNG/LNG en motoren op diesel te verminderen. De beschikbare informatie hierover is op dit moment nog niet voldoende om hier harde conclusies over te trekken.

³⁷ De import van aardgas zal er toe leiden dat de ketenemissies van deze brandstof met 8 tot 18% toenemen. Hoewel CNG hierdoor energetisch slechter wordt dan benzine en diesel, blijft op het gebied van broeikasgasemissie een voordeel in de orde van 10% bestaan.

Duidelijk is dat er voor CNG een nieuwe keten met relatief hoge kosten moet worden opgezet. Op dit moment is er sprake van een overheidsbijdrage aan het opzetten van het distributienet (subsidies vulpunten), de brandstof (accijnskorting), en de voertuigen (BPM- en MRB-voordeel). Daarnaast wordt er geïnvesteerd in informatiecampagnes gericht op consumenten en bedrijven. Op basis van de aannames gedocumenteerd in (Uyterlinde et al, 2008) kan voor het jaar 2020 een (nationale) kosteneffectiviteit voor CNG van 300-500 €/ton vermeden CO₂ afgeleid worden. Hierbij is nog geen rekening gehouden met een stijging van de CNG ketenemissies als gevolg van aardgasimport. Voor biogas zal de kosteneffectiviteit waarschijnlijk gunstiger uitvallen, omdat de CO₂ emissiereductie groter is, en zal de kosteneffectiviteit richting die van vloeibare biobrandstoffen gaan.

Als de transitie naar groen gas, die nog met veel onzekerheden is omgeven, niet tot stand komt, is op langere termijn het rendement van de investeringen beperkt tot de CO₂ winst van CNG. Daarnaast kan er dan sprake zijn van een *technology lock-in* situatie. Er is grootschalig geïnvesteerd in een suboptimale technologie, waardoor de transitie naar meer structurele oplossingen voor de lange termijn bemoeilijkt wordt. Overigens zijn de benodigde stimuleringskosten voor grootschalige penetratie van waterstof of elektrische voertuigen, gezien de huidige status van marktontwikkeling, veel hoger dan die voor CNG, evenals de onzekerheden.

Legitimiteit van overheidsbijdrage

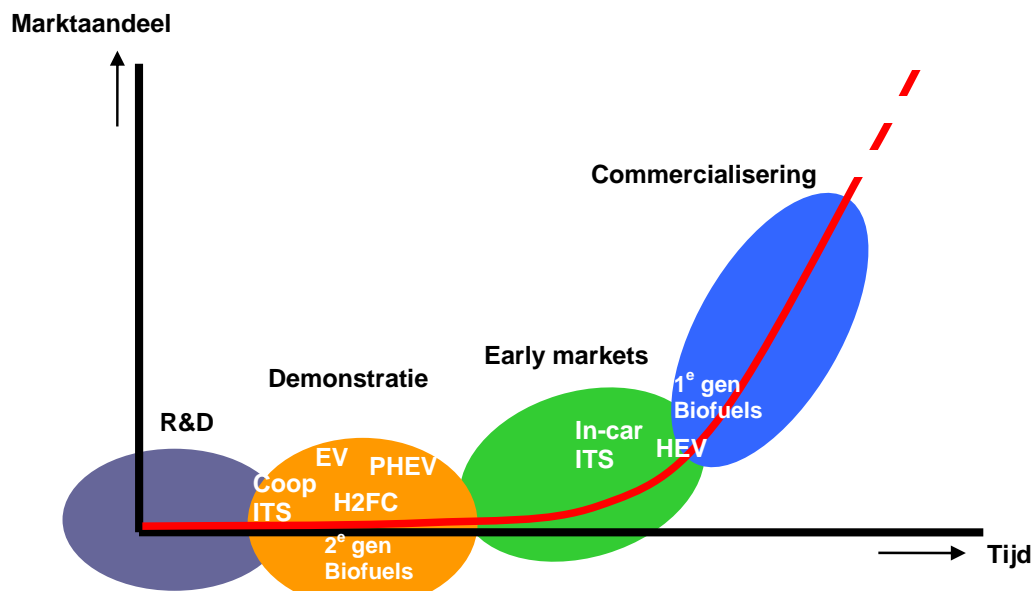
Het subsidiëren van vulpunten voor alternatieve brandstoffen is onderdeel van het werkprogramma Schoon en Zuinig. Bij CNG is er duidelijk sprake van het ‘kip-ei’ probleem: zolang er geen netwerk van vulpunten is, zal er geen grootschalige marktpenetratie tot stand komen³⁸. Overheidsingrijpen, zoals op dit moment gebeurt met behulp van subsidies, is inderdaad een manier om deze impasse te doorbreken. Ook het financieel ondersteunen van de brandstof en het voertuig kunnen manieren zijn om de marktintroductie van een nieuwe technologie te stimuleren. De voorvraag is echter, of CNG, vergeleken met alternatieven, voldoende bijdraagt aan klimaat-, milieu- of voorzieningszekerheidsdoelen. In het verlengde hiervan ligt de vraag of de transitie naar groen gas in de transportsector prioriteit moet krijgen boven diverse alternatieven.

³⁸ Voor de eigenaar van het voertuig geldt natuurlijk wel de randvoorwaarde dat het hele financiële beeld voldoende aantrekkelijk moet zijn.

9. Beleidsanalyse

9.1 Aandachtspunten voor innovatiebeleid

De introductie van een nieuwe technologie verloopt in een aantal fasen. Na een succesvol R&D-traject volgt opschaling in demonstratieprojecten, tot grootschalige uitrol in early markets, waarna de vroege commercialisering begint. In Figuur 9.1 is indicatief, op basis van de informatie in de voorgaande hoofdstukken, een indeling gegeven van de transitiepaden naar innovatiefase. Wat opvalt, is dat de meeste technologieën zich in de demonstratiefase bevinden. Dit is een momentopname, en de snelheid waarin de fasen doorlopen worden zal verschillen. Zo zal het bij waterstof tot 2020 duren voordat begonnen kan worden met grootschalige uitrol, terwijl dat bij elektrisch vervoer mogelijk sneller zal gaan. De figuur illustreert ook dat er een tweede groep van technologieën is die zich al dichter bij de markt bevindt.

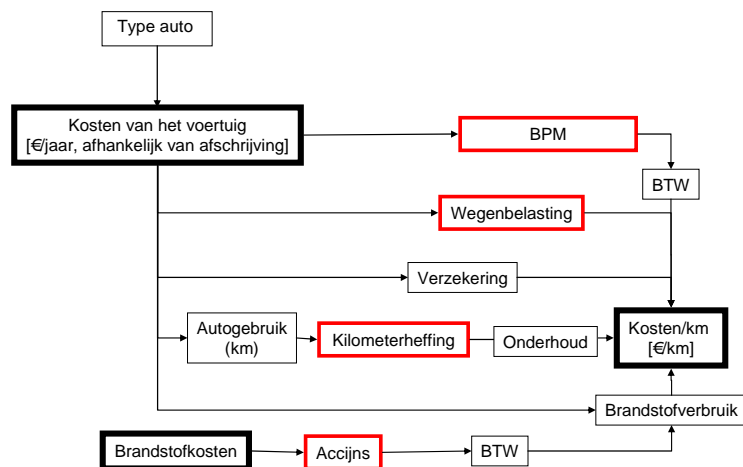


Figuur 9.1 Huidige positie van de transitiepaden in de innovatie cyclus

De keuze van beleidsinstrumenten is sterk gerelateerd aan de fase waarin de ontwikkeling van de technologie zich bevindt. In de R&D-fase is financiële ondersteuning door de overheid het meest op zijn plaats, omdat het om precompetitief onderzoek gaat. Ook in de demonstratiefase vereist de opschaling van prototype naar demonstratieprojecten nog substantiële R&D-inspanningen. Hier gaat het vooral om competitief onderzoek dat voor een groot deel op basis van industrieel R&D-geld wordt uitgevoerd. Het gebruikelijke instrumentarium voor marktintroductie - subsidies, heffingen, verplichtingen - is nog niet geschikt. Financiële instrumenten zijn nog niet toepasbaar vanwege de hoge meerkosten, en regulering of verplichtingen zijn niet geschikt zolang er nog sprake is van substantiële technologische risico's. Het is in deze fase wel van belang om marktpartijen en technologie ontwikkelaars een lange termijn perspectief te bieden, bijvoorbeeld door het stellen van doelstellingen. Vanaf het einde van de demonstratiefase, wanneer de overgang naar 'early markets' gemaakt wordt, zullen de kosten gaan dalen als gevolg van schaalvoordelen en leereffecten. Daarmee moet de overgang tot minder gemakkelijke early markets gemaakt worden, totdat er sprake is van vroege commercialisering.

Aangrijpingspunten fiscale of financiële stimulering

Verschillende technologieën, zoals hybride voertuigen en eerste generatie biobrandstoffen, bevinden zich al wel in early markets of verder. Voor deze technologie zijn de belangrijkste aangrijpingspunten voor stimulering te vinden in het fiscale stelsel rond autobezit en -gebruik, zie Figuur 9.2. Het is belangrijk om per technologie de balans te zoeken tussen steun aan voertuig en brandstof. Om overstimulering te voorkomen, is het noodzakelijk om het marktaandeel en de kostendaling van een voertuig of technologie te monitoren en de steunniveaus tijdig bij te stellen. In een oververhitte markt neemt de leersnelheid af en neemt de cumulatieve investering die nodig is totdat de nieuwe technologie kan concurreren met de conventionele technologie sterk toe. Verder is er bij het geven van financiële steun een lange adem nodig. (Schoots en Jeeninga, 2008) hebben laten zien dat het budget voor stimulering in eerste instantie sterk oploopt, omdat de kostendaling afhankelijk is van de behaalde volumes. De piek in stimuleringsuitgaven doet zich voor op het moment dat de kostendaling van de technologie al halverwege is.



Figuur 9.2 *Aangrijpingspunten fiscale stimulering*

Aangezien de BPM tussen nu en 2018 gefaseerd afgebouwd wordt, in verband met de invoering van de kilometerbeprijzing, vervalt de mogelijkheid om de aanschaf van schone auto's fiscaal te stimuleren. Een equivalente CO₂-differentiatie in de kilometerprijs heeft waarschijnlijk een minder sterk effect, omdat consumenten een hoge discontovoet voor toekomstige uitgaven hanteren. Dit betekent dat meerkosten op het moment van aankoop een belangrijkere rol spelen dan toekomstige opbrengsten. Na afschaffing van de BPM zal gezocht moeten worden naar andere financiële prikkels ten tijde van aankoop.

Het stimuleren via de brandstofaccijns is in de praktijk vooral een mogelijkheid zolang het marktaandeel van de betreffende brandstof beperkt is. Bij een groei zal de inkomstenderving van de overheid groot worden en is een accijnsvrijstelling waarschijnlijk niet meer houdbaar. Het is zaak om bij consumenten in dit opzicht reële verwachtingen te scheppen. Een hoge olieprijs geeft niet voldoende prikkel voor klimaatneutrale brandstoffen, omdat alternatieven zoals 'coal to liquid', fossiele waterstof of elektriciteit ook aantrekkelijk worden, tenzij er ook sprake is van een CO₂-prijs of -heffing. Daarnaast dempen de brandstofaccijnzen voor de consument de effecten van een hoge olieprijs.

Generiek of specifiek beleid

Op termijn kunnen technologie specifieke instrumenten worden vervangen door generiek stimuleringsbeleid (HyWays, 2007). Het is van belang om ook in de instrumenten die op de korte termijn emissiereductie en efficiëntie verbetering moeten bewerkstelligen prikkels in te bouwen die de ontwikkeling van lange termijn opties stimuleren en de inzet van R&D-fondsen niet te beperken tot conventionele (ICE-gebaseerde) technologie. Ambitieuze emissie-eisen voor nieuwe voertuigen maken dat automobiefabrikanten zich primair gaan richten op het behalen van de korte termijn doelstellingen via incrementele verbeteringen van conventionele technologie. Fabrikanten die deels in de doelstelling voorzien via (veel duurdere) technologie die veel beter is

dan de norm, zouden hiervoor moeten worden beloond. Dit zou kunnen door weegfactoren in te voeren die een toenemend gewicht krijgen naarmate een voertuig veel beter is dan de norm. Hiermee wordt voorkomen dat innovatieve bedrijven die werken aan vergaande verbeteringen worden ‘gestraft’ binnen een beleidskader dat gedomineerd wordt door voortschrijdende normstelling die is gebaseerd op korte termijn technologische en financiële haalbaarheid. Daarnaast zouden ook voor de middellange en lange termijn specifieke eisen moeten worden vastgelegd, zodat de industrie de nodige tijd heeft om zich voor te bereiden op het halen van doelstellingen die niet tot nauwelijks meer via conventionele opties te halen zijn.

9.2 Instrumentatie transitiepaden

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de belangrijkste uitdagingen en barrières voor een verdere marktintroductie, per transitiepad.

Tabel 9.1 *Belangrijkste uitdagingen per transitiepad*

| Voertuig | Brandstof / infrastructuur | Algemeen |
|---|---|---|
| <i>Transitiepad: Biobrandstoffen</i> | | |
| Voor benzine-auto's: overgang naar flexi-fuel vloot | 1 ^e generatie - beschikbaarheid duurzame grondstoffen 2 ^e generatie - technologische ontwikkeling: <ul style="list-style-type: none"> • FT diesel: grootschalige biomassavergassing en conditionering syngas, hoge kosten • Bio-ethanol: ontsluiting cellulose uit grondstof en kosten enzymen Aanleg vulpunten voor E85 en eventueel B100 (alleen nodig voor 1 ^e generatie biodiesel) | Duurzaamheidsaspecten: <ul style="list-style-type: none"> • broeikasgasbalans • food vs. fuel • indirecte effecten via landgebruik Werkbaarheid vs. brede dekking van certificeringssystemen |
| <i>Transitiepad: Waterstof</i> | | |
| Technologische ontwikkeling brandstofcelauto: <ul style="list-style-type: none"> • Aandrijflijn • Opslag H₂ in auto • Levensduur en materiaal brandstofcel Initieel hoge meerkosten. | Aanleg en kosten distributie infrastructuur: <ul style="list-style-type: none"> • Initieel in vloeibare vorm (tankwagens) • Hoge aanloopverliezen bij anticiperen op groei • Juridische en ruimtelijke aspecten bij aanleg pijpleidingen Productie schone H ₂ : <ul style="list-style-type: none"> • Demonstratie en opschaling biomassavergassing • Demonstratie en opschaling CCS | Onderlinge afstemming ontwikkeling onderdelen van de keten (productie, infrastructuur, vraag) |
| <i>Transitiepad: Hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer</i> | | |
| Ontwikkeling accu: <ul style="list-style-type: none"> • Prijs en levensduur • veiligheid en milieuaspecten • energiedichtheid en gewicht Ontwikkeling aandrijving en elektromotor Typekeuring | Aanleg oplaad infrastructuur Ontwikkeling faciliteiten voor snelladen of wisselaccu's Inpassing in elektriciteitsnet Productie schone elektriciteit | Standaardisatie infrastructuur. Flexibele keuze elektriciteitsleverancier |
| <i>Transitiepad: Energiebesparende ICT</i> | | |
| Technologie ontwikkeling | Technische standaard voor communicatie Aanleg communicatie infrastructuur langs wegen | Gebruikersacceptatie Aansprakelijkheidswetgeving |

Voor de meeste transitiepaden is op dit moment nog ‘maatwerk’ nodig om de verschillende barrières te kunnen slechten, zoals verder uitgewerkt in Tabel 9.2. Generiek beleid, zoals emissiehandel is nog niet geschikt, omdat het vooral prikkels bevat voor technologie die al dicht bij de markt is, en daardoor vooral incrementele verbeteringen stimuleert. Met betrekking tot het belang van de diverse uitdagingen, geldt dat de kosten voor een infrastructuur per voertuig meestal lager dan zijn dan de additionele kosten voor het voertuig. De meerkosten van het voertuig en eventueel hogere kosten voor de brandstof (bijvoorbeeld waterstof) zullen vaak doorslaggevend zijn voor het kostenplaatje van een transitie en daarmee de kans op succes mede bepalen.

Tabel 9.2 *Instrumentatie korte termijn per transitiepad en aangrijpingspunt*

| Voertuig (bezit of gebruik) | Brandstof / infrastructuur | Flankerend beleid |
|--|---|--|
| <i>Transitiepad: Biobrandstoffen</i> | | |
| BPM-korting of subsidie voor flexi-fuel voertuigen (E85) | Verplichting of accijnsvrijstelling; differentiatie o.b.v. CO ₂ Subsidie vulpunten E85 | Certificering duurzaamheid, eventueel met minimale CO ₂ -prestatie-eis R&D-steun 2 ^e generatie, i.s.m. private partijen Ondersteuning investeringsrisico's 2 ^e generatie Versterken landbouw |
| <i>Transitiepad: Waterstof</i> | | |
| Grootschalige demonstratieprojecten met compensatie meerkosten voertuig | Demonstratiefase: Subsidie brandstof Subsidie vulpunten <i>Later bij uitrol: eisen in concessie</i> | R&D-ondersteuning, perspectief bieden aan industrie Stimuleren schone productie <i>Later: toegang tot binnensteden, preferente parkeerplaatsen etc.</i> |
| <i>Transitiepad: Hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer</i> | | |
| Voor hybride: BPM-korting of subsidie Voor PHEV en EV: Grootschalige demonstratieprojecten met compensatie meerkosten voertuig | Kosten: lage accijns elektriciteit Aanleg oplaad infrastructuur (verplichting lokale overheid) | Toegang tot binnensteden, preferente parkeerplaatsen etc. (nu al voor hybride) Regulering keuze elektriciteitsleverancier |
| <i>Transitiepad: ITS</i> | | |
| Pilots leasevloot EU verplicht in nieuwe auto's | N.v.t. | Gebruikersacceptatie Aansprakelijkheidswetgeving |

9.3 Internationaal perspectief

Voor een aantal onderdelen van de transitiepaden is Europese schaalgrootte of coördinatie een voorwaarde. Dat geldt allereerst voor het gecoördineerd ontwikkelen en op de markt brengen van voertuiginnovaties (elektrisch, waterstof, ITS) met zodanige schaalgrootte, dat zij R&D-investeringen en verdere kostendaling door opschaling mogelijk maakt. Hierbij moet zowel ondersteuning worden gegeven op het gebied van R&D in de precompetitieve fase als op het gebied van grootschalige demonstratie en ontwikkeling van ‘early markets’. Belangrijk hierbij is dat de verschillende instrumenten op elkaar aansluiten, zodat de overgangen tussen de verschillende fases soepel kunnen verlopen, en de zogenaamde ‘valley of death’ vermeden wordt. De industrie zal pas een substantieel deel van haar eigen R&D-geld gaan gebruiken voor een lange termijn optie indien er voldoende marktperspectief is. De R&D-prikkels moeten Europees worden gecoördineerd, evenals de marktontwikkeling. Iets soortgelijks geldt voor het verder ontwikkelen van 2^e generatie biobrandstoffen technologie, waar momenteel al veel internationale marktpartijen aan werken.

Daarnaast kunnen er op Europees niveau eisen gesteld worden aan het voertuigaanbod. De klimaatprestaties van voertuigen kunnen beïnvloed worden door CO₂-normering, die op dit moment in voorbereiding is. Het is wenselijk om de markt een lange termijn perspectief te geven

met een extra prikkel (of weegfactor) voor oplossingen die veel verder gaan dan de normen op korte termijn, zie ook 9.1.

Certificering van biobrandstoffen kan, vanwege de gewenste reikwijdte van het systeem, het best Europees en bij voorkeur zelfs mondiaal toegepast worden. Met de Commissie Cramer heeft Nederland zich wel gepositioneerd als één van de trekkers in de discussie rond duurzaamheid van biobrandstoffen, en kan Nederland de discussie verder sturen. Voor het beperken van de concurrentie tussen 1^o generatie biobrandstoffen en voedselproductie dient sterk te worden ingezet op het rationaliseren van de landbouw en het verhogen van de opbrengsten per hectare. Omdat de grootste mogelijkheden daarvoor buiten Nederland liggen, vereist dit minimaal een aanpak op EU-niveau. Ook hiervoor geldt overigens dat Nederland een sterke reputatie heeft op het gebied van landbouw en ontwikkeling, en een agenderende rol kan vervullen.

Tenslotte zal er, vanwege het internationale karakter van de transportsector, wet- en regelgeving moeten worden ontwikkeld of geharmoniseerd op het gebied van veiligheid, typekeuringen, en aansprakelijkheid. Ook is er behoefte aan Europese ICT-standaarden voor het opladen van elektrische voertuigen, het communiceren met Elektriciteitsleverancier, en communicatie tussen voertuigen en de ‘wegkant’.

9.4 Wat kan Nederland doen?

Nederland kan geen winnaar kiezen, maar binnen de koers die Europa vaart, strategische keuzes maken die de nationale belangen het beste dienen. Zoals al aangegeven, kan Nederland agenderend zijn op het gebied van duurzaamheid van biobrandstoffen en versterking van de landbouw. Ook kan Nederland coalities vormen met andere landen om invloed uit te oefenen op het Europese beleid, bijvoorbeeld voor scherpe CO₂-normen voor voertuigen. Het is hierbij belangrijk om oog te hebben voor het spanningsveld tussen voortschrijdende normstelling en systeeminnovatie. Korte termijn beleid (optimalisering van bestaande voertuigen) mag niet leiden tot negatieve effecten op innovatie-inspanningen. Gegeven het voertuigaanbod, kan Nederland vervolgens de vraag stimuleren naar de voertuigen met de beste klimaatprestaties en de vraag ontmoedigen naar de minst klimaatvriendelijke voertuigen. Ook kan Nederland op korte termijn inzetten op robuuste opties zoals hybride voertuigen, in-car ITS, en banden met lage rolweerstand. Nederland heeft al met succes fiscale instrumenten - BPM-korting en lagere bijtelling voor leaserijders - gehanteerd om hybride auto's te stimuleren.

Er is ook een aantal niches waar Nederland een voortrekkersrol kan spelen. Op het gebied van stadsbussen kan Nederland via specifieke beleidsmaatregelen (bijvoorbeeld via criteria in de aanbesteding van openbaar vervoer) een markt voor brandstofcelbussen creëren. Parallel daaraan kan de Nederlandse industrie gestimuleerd worden een brandstofcel bus te ontwikkelen. Het is hierbij essentieel om de ontwikkeling van de vraag aan te laten sluiten bij de ontwikkeling van het aanbod.

De Nederlandse overheid loopt Europees voorop in het invoeren van de kilometerbeprijzing en heeft internationaal een sterke positie op het gebied van hightech systemen en materialen. Dit biedt kansen voor ITS, en andersom heeft Nederland, als dichtbevolkt land, ook belang bij een verdere ontwikkeling van ITS-opties die de doorstroming en veiligheid bevorderen. Het is relatief eenvoudig om hierbij de energiebesparende ITS-opties ook te stimuleren, tenzij een verbeterde doorstroming leidt tot een groei van het verkeersvolume.

Voor de introductie van elektrische of brandstofcelvoertuigen in Nederland, is Nederland allereerst afhankelijk van de keuze die de grote automobielfabrikanten maken. Deze beslissingen zijn alleen te beïnvloeden op Europees niveau, maar zouden bij voorkeur aan moeten sluiten bij ontwikkelingen in de VS en Japan. Wel kan Nederland relatief zelfstandig beleid ontwikkelen voor de opbouw van de bijbehorende infrastructuur van oplaadpunten voor elektriciteit of waterstof vulpunten. Vooruitlopen op de muziek heeft hierbij geen zin; het is vooral een kwestie van in de pas lopen. De grootschalige introductie van elektrisch rijden lijkt, doordat de verande-

ring in het energiesysteem en voertuig minder ingrijpend is, iets dichterbij dan die van rijden op waterstof, maar voor beide geldt dat er nog innovaties op diverse fronten (technologie, infrastructuur) nodig zijn. Nederland kan daarom met beide technologieën ervaring opdoen in demonstratieprojecten, en early markets creëren in samenwerking met wagenparkbeheerders en openbaar vervoer bedrijven. Lokale overheden kunnen hierbij een sleutelrol spelen.

Hoewel een keuze voor waterstof of elektrisch op dit moment nog prematuur lijkt, is het wel verstandig als Nederland binnen de transitiepaden prioriteiten stelt en de beperkte middelen strategisch inzet. Hierbij hoort ook het vermijden van een lock-in. Recentelijk is de aandacht voor het stimuleren van het rijden op aardgas (CNG) toegenomen. Vervanging van de ene fossiele brandstof (olie) door een andere (aardgas) heeft echter slechts beperkte voordelen voor het klimaat en de voorzieningszekerheid, en dan vooral op de korte termijn. Rijden op aardgas kan wel een bijdrage leveren aan verbeterde luchtkwaliteit, zeker voor stadsbussen. Echter, met de aanscherping van de EURO-normen worden conventionele voertuigen ook steeds schoner. Rond 2015 zal het extra milieuvoordeel van nieuwe CNG voertuigen daarom veel kleiner zijn. Het lange termijn perspectief van CNG zou daarom vooral gezocht moeten worden in een transitie naar rijden op groen gas. Het potentieel voor biogas uit vergisting van reststromen is beperkt, en zou rond de 10% van de energievraag van het wegverkeer kunnen dekken, mits niet voor andere sectoren ingezet. Voor het meerdere is deze transitie afhankelijk van SNG uit geïmporteerde biomassa, die ook als vloeibare brandstof (FT diesel) of voor duurzame elektriciteitsproductie ingezet kan worden. Voor deze biomassa geldt dezelfde duurzaamheidsdiscussie als voor vloeibare biobrandstoffen.

10. Conclusies en aanbevelingen

De overheid hanteert een viertal transitiepaden voor het thema Duurzame Mobiliteit, die richting geven aan de ambities geformuleerd in de programma's Schoon en Zuinig en 'de Auto van de Toekomst Gaat Rijden'. In deze studie is voor deze vier transitiepaden, en drie achterliggende innovatiescenario's, een inschatting gemaakt van de bijdrage aan klimaatdoelen en de kosteneffectiviteit. Vervolgens is voor ieder transitiepad in kaart gebracht wat de implicaties voor beleid zijn en zijn er suggesties voor beleidsinstrumenten gedaan. Dit hoofdstuk geeft de belangrijkste conclusies, een aantal beleidsaanbevelingen en de mogelijkheden voor vervolgonderzoek.

10.1 Conclusies

Innovatie kan via verschillende routes substantiële emissiereductie bewerkstelligen

De drie innovatiescenario's resulteren, met verschillende uitgangspunten, in een vergelijkbare en substantiële reductie van de CO₂-ketenemissies van het Nederlandse wegverkeer. De scenario's zijn grotendeels een aanvulling op het beleidspakket dat in het werkprogramma Schoon en Zuinig is voorgesteld, met het oog op de langere termijn. Rond 2030 wordt het niveau van 1990 bereikt. Daarna biedt alleen scenario 2, waarin (CO₂-arm geproduceerd) waterstof doorbreekt, nog uitzicht op een forse extra emissiereductie³⁹. De overige scenario's slagen er wel in om de mobiliteitsgroei te compenseren. Voor het behalen van deze reductie is het essentieel dat biobrandstoffen, waterstof en elektriciteit in hoge mate klimaatneutraal geproduceerd zijn. Verdiepseling van het personenauto wagenpark biedt geen reëel alternatief: de reductie is beperkt tot maximaal 5% van de emissies van personenauto's. Voor de overige emissies, NO_x en PM₁₀, is de bijdrage van innovaties beperkt in vergelijking met het effect van de aangescherpte EURO-normen.

Op de korte termijn: hybride voertuigen en eerste generatie biobrandstoffen

Een aantal technologieën, zoals hybride voertuigen, eerste generatie biobrandstoffen, en in-car ITS, is al voldoende ver ontwikkeld voor grootschalige marktintroductie. Om aan de Nederlandse 2020 doelstellingen te voldoen, liggen hier mogelijkheden om verdergaande reducties te bereiken dan met het al ingezette beleid voorzien is (inclusief Europese CO₂-normstelling). Helaas bieden die technologieën op de langere termijn onvoldoende perspectief, zoals geïllustreerd in scenario 1. Bovendien is er bij eerste generatie biobrandstoffen, behalve van een beperkt potentieel, ook sprake van mogelijk sterke ongewenste neveneffecten, als gevolg van veranderend landgebruik en concurrentie met de wereldvoedselvoorziening.

Op middellange en lange termijn behoefte aan systeeminnovaties

Om ook in 2030 en daarna een substantiële reductie te bereiken voor de transportsector, waarbij de mobiliteitsgroei meer dan gecompenseerd wordt, is het belangrijk om een traject in te zetten naar grotendeels klimaatneutrale secundaire energiedragers: elektriciteit of waterstof. De technologie uit deze twee transitiepaden is echter nog niet commercieel beschikbaar, en vergt bovendien systeeminnovaties binnen de transportsector. Indien, zoals in de achterliggende scenario-beelden, tijdig begonnen wordt met de vervanging van het wagenpark, kan in 2030 al een behoorlijke bijdrage worden geleverd door deze innovaties. Hierbij is essentieel dat de betreffende secundaire energiedrager ook daadwerkelijk via grotendeels klimaatneutrale routes wordt geproduceerd, waarbij CCS een belangrijke rol speelt⁴⁰. Maar in 2040 zal het effect van een succesvolle doorbraak van één van deze twee technologieën veel groter zijn en verreweg de belang-

³⁹ Elektrisch vervoer kan een vergelijkbare verbetering opleveren indien het marktaandeel zou bereiken die vergelijkbaar zijn met het in Scenario 2 veronderstelde marktaandeel voor waterstof, omdat de relatieve emissie per kilometer vergelijkbaar is als de gebruikte elektriciteit duurzaam is geproduceerd (100 g/kWh).

⁴⁰ Er zijn ook klimaatneutrale routes mogelijk zonder CCS, alleen vergen die een sterke stijging van duurzame elektriciteit- of waterstofproductie.

rijkste bijdrage leveren van de in deze studie onderzochte technologieën. In dit geval zal de bijdrage van de korte termijn oplossingen afnemen doordat het conventionele wagenpark (ICE met fossiele en biobrandstoffen) kleiner wordt. Daarnaast zal de bijdrage van biobrandstoffen lager zijn doordat een deel van de benodigde biomassa ingezet zal worden voor de duurzame productie van waterstof of elektriciteit.

Lange termijn keuze tussen waterstof en elektrisch vervoer nog niet duidelijk

Als grotendeels klimaatneutrale energiedragers bieden waterstof en elektrisch vervoer beide een interessant toekomstperspectief met substantiële energiebesparing en emissiereductie. Waterstof heeft wellicht een iets groter emissie reductiepotentieel⁴¹, maar vergt ook een ingrijpendere systeemwijziging. Elektrisch vervoer zou eerder marktrijp kunnen zijn, maar de emissiereductie is sterk afhankelijk van de productiewijze. Bij een sterke verduurzaming van de elektriciteitssector in combinatie met een sterke verbetering van de actieradius, kan elektrisch vervoer een vergelijkbare reductie behalen als waterstof. De transitiepaden elektrisch vervoer en waterstof sluiten elkaar overigens, zeker op termijn, niet uit. Wel kan er sprake zijn van versnipperde financiering, waardoor beide uiteindelijk langzaam gerealiseerd worden, en waterstof wellicht helemaal niet. Op lange termijn zijn ook combinaties mogelijk. Te denken valt aan het doorontwikkelen van de plug-in hybride, met het vervangen van de verbrandingsmotor door een brandstofcel, die de accu oplaadt. Afhankelijk van kosten en performance ontwikkeling zal er een verdeling ontstaan tussen de brandstofcelauto, de elektrische auto en de plug-in hybride.

Transitiepaden sorteren grootste effect bij lichte voertuigen

De vier beschouwde transitiepaden bieden vooral mogelijkheden tot energiebesparing en emissiereductie bij lichte voertuigen. Omdat alle technologieën inpasbaar zijn bij personenauto's en bestelwagens, zijn daar reducties van 45% tot 65% mogelijk in 2040; de maximale reductie bij grootschalige toepassing van de brandstofcelauto op basis van klimaatneutraal geproduceerde waterstof. Bij bussen is in dat geval een reductie van 65% mogelijk; anders tot 35%. Voor vrachtwagens is slechts een 20% tot 30% reductie gevonden, grotendeels te danken aan biobrandstoffen. Dit beperkte potentieel geeft aan dat de transitiepaden Duurzame Mobiliteit wellicht te weinig aandacht schenken aan mogelijke (andere) innovaties voor het vrachtverkeer.

Prioriteiten per segment

De markt voor *personenauto's* is omvangrijk en biedt mogelijkheden voor alle beschouwde innovaties. Vanwege de omvang van de markt zal een technologie hier vaak pas in de commercialiseringsfase grootschalig geïntroduceerd kunnen worden. Bij *bestelwagens* zijn mogelijkheden om bepaalde innovaties versneld te laten penetreren doordat zij vaak onderdeel zijn van grote, soms lokaal gebonden, wagenparken, waarvan de eigenaren (bedrijven) gevoelig zijn voor economische prikkels. *Autobussen* bieden een geschikte niche voor innovatie. Vooral stads- en streekbussen, die iedere dag terugkeren naar een remise, kunnen met een paar goed geplaatste vulpunten overstappen naar een alternatieve brandstof zonder hoge kosten voor de infrastructuur. Door het beperkte aantal vlooteigenaren en de vaak directe relatie met de (lokale) overheid als verlener van concessies, biedt dit segment extra aanknopingspunten voor een succesvolle instrumentatie van de innovatieve technologieën. Ook biedt de aanwezigheid van een Nederlandse busproducent mogelijkheden om bepaalde technologieën versneld marktrijp te krijgen. Bij *vrachtwagens* is een aantal innovaties niet goed inpasbaar vanwege de lange-afstands rijden met zware belading. Naar verwachting zal ICE het wagenpark blijven domineren en zijn biobrandstoffen en energiebesparende technologie de belangrijkste opties. Vanwege het grote belang van tweede generatie biobrandstoffen voor het vrachtverkeer is het te overwegen om de R&D en marktintroductie van FT diesel prioriteit te geven boven die van tweede generatie bioethanol.

⁴¹ Voor waterstof is als uitgangspunt een productieroute gekozen die erg dicht bij de meest duurzame productieroute ligt, omdat bij een sterk toenemende vraag naar duurzame waterstof vanuit de transportsector, er veel nieuwe productiecapaciteit zal worden gebouwd. Bij elektriciteit is de manier waarop de toegenomen vraag wordt ingevuld afhankelijk van het laadmoment. Hierbij is niet te voorkomen dat die deels vanuit bestaande (minder duurzame) centrales geleverd zal worden. Daarom is uitgegaan van het parkgemiddelde.

Transitiepaden verbeteren de voorzieningszekerheid

Het transitiepad energiebesparende ICT biedt een robuuste optie om de voorzieningszekerheid te verbeteren omdat het direct tot een lagere (al dan niet fossiele) brandstofvraag leidt. Bio-brandstoffen verbeteren de voorzieningszekerheid door een deel van de fossiele brandstofbehoefte te vervangen door hernieuwbare brandstoffen⁴². Bijkomend voordeel van beide opties is dat ze ingezet kunnen worden in alle segmenten van het wegverkeer, ook het vrachtverkeer. Elektrisch vervoer en waterstof verminderen alleen de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen als zij duurzaam geproduceerd worden. Dit zal in een toekomstbeeld waarin het klimaatbeleid hoog op de agenda staan meer en meer het geval zijn. Zelfs als dit niet het geval is, biedt de toegenomen flexibiliteit mogelijkheden tot diversificatie.

Innovatie is niet goedkoop, maar er zijn kostendalingen te verwachten

De kosteneffectiviteiten van de innovatiescenario's ontlopen elkaar niet veel, ze dalen van € 200-300 per ton vermeden CO₂ (keten) in 2020 tot rond de € 100 per ton in 2040. De kosten zijn bepaald vanuit een nationaal kostenperspectief, en zijn het resultaat van een stijging van de kosten van het wagenpark (van 10% in 2020 tot 15% in 2040), in combinatie met dalende brandstofkosten (tussen de 10% en 20% in 2040), deels dankzij energiebesparing. Bij een gevoeligheidsanalyse waarin de prijs van ruwe olie en aardgas 50% hoger is verondersteld, daalt de kosteneffectiviteit van de scenario's veel sneller om rond de € 50 per ton te eindigen in 2040.

De verschillende transitiepaden hebben verschillende kosteneffectiviteiten. Biobrandstoffen hebben naar verwachting rond 2020 een kosteneffectiviteit van ongeveer € 150 per ton vermeden CO₂ (ketenemissie), vooral als gevolg van de nog hoge kosten voor 2^e generatie brandstoffen. Waterstof en elektrisch vervoer naderen dan pas de commerciële fase met door de hoge aanloopkosten nog een kosteneffectiviteit van meer dan € 300 per ton vermeden CO₂. Het transitiepad ICT is een uitzondering, doordat relatief lage investeringskosten gepaard gaan met een substantiële brandstofbesparing. Door leereffecten en schaalvoordelen kunnen de kosten van 2^e generatie biobrandstoffen, waterstof (voertuig en brandstof) en elektrische voertuigen nog substantieel dalen. Rond 2040 kunnen de betreffende opties, als voldoende schaalgrootte is bereikt, een kosteneffectiviteit van tussen de € 75 en € 150 per ton CO₂ bereiken om gecombineerd met de overige ontwikkelingen in het achtergrondscenario te leiden tot een kosteneffectiviteit van de scenario's van circa € 100 per ton. Deze kosteneffectiviteiten moeten met enige voorzichtigheid gehanteerd worden omdat er nog diverse onzekerheden zitten in de lange termijn kostenontwikkelingen van de betreffende technologieën en de brandstofprijzen. Het punt van rentabiliteit valt bij dit prijsniveau binnen de onzekerheidsmarge.

Transitiebeleid is in eerste instantie technologie specifiek

Concluderend kan gesteld worden dat het halen van de lange termijn doelen in de transportsector alleen mogelijk is via (vrijwel) nul-emissie technologie, zoals energiebesparing, duurzame waterstof en elektriciteit, en duurzame biobrandstoffen. Ontwikkeling van deze lange termijn optie(s) moet plaats vinden voordat de grenzen van het verder optimaliseren van de interne verbrandingsmotor, voor het behalen van voortschrijdende normen, in zicht komen.

De meeste opties zijn nu nog in demonstratiefase. Vanwege de schaalgrootte is Europees beleid cruciaal, en het is nog niet duidelijk welke technologie de winnaar zal blijken te zijn. Wel is duidelijk dat er, om innovaties in de markt te zetten, financiële steun nodig is gedurende een lange periode. Bovendien blijkt de aard en timing van de transitiepaden zo verschillend te zijn, dat generiek (bron) beleid niet zal voldoen. Dat impliceert dat inpassing in een (Europees) emissiehandelssysteem geen stimulans zal geven aan de technologieën die nog te ver van de markt af staan.

⁴² Deze optie heeft potentieel een grote maar wel beperkte omvang. Een 'te hoge' vraag naar biobrandstoffen kan de markt zodanig beïnvloeden dat er minder duurzame opties op de markt verschijnen, met sterke ongewenste bijeffecten (bv. op het vlak van landgebruik of de wereldvoedselvoorziening).

10.2 Beleidsaanbevelingen

Voor Nederlands beleid kunnen de volgende korte termijn aanbevelingen geformuleerd worden.

- Algemeen: coalities vormen met andere landen om invloed uit te oefenen op het Europese beleid, bijvoorbeeld voor scherpe CO₂-normen voor voertuigen. Het is hierbij belangrijk om oog te hebben voor het spanningsveld tussen voortschrijdende normstelling en systeeminnovatie. Uitgaande van het Europese (of zelfs mondiale) voertuigaanbod, kan Nederland de vraag stimuleren naar de voertuigen met de beste klimaatprestaties en de vraag ontmoedigen naar de minst klimaatvriendelijke voertuigen.
- Ook kan Nederland inzetten op robuuste opties zoals hybride voertuigen, in-car ITS, en banden met lage rolweerstand. Nederland heeft recent met succes fiscale instrumenten - BPM-korting en lagere bijtelling voor leaserijders - gehanteerd om hybride auto's te stimuleren. Bij het aanpassen van het fiscale stelsel rond autobezit en autogebruik, in verband met invoering kilometerbeprijzing, is het raadzaam mogelijkheden open te houden om de aankoop van schone voertuigen te stimuleren, dan wel die van vervuilende voertuigen minder aantrekkelijk te maken.
- Aangezien een keuze voor waterstof of elektrisch op dit moment nog prematuur lijkt, kan Nederland met beide technologieën ervaring opdoen in demonstratieprojecten, en early markets creëren in samenwerking met wagenparkbeheerders en openbaar vervoer bedrijven. Lokale overheden kunnen hierbij een sleutelrol spelen.
- Hoewel Nederland sterk afhankelijk is van Europees beleid, is het verstandig als Nederland binnen de transitiepaden prioriteiten stelt en de beperkte middelen strategisch inzet. Hierbij hoort ook het vermijden van een lock-in. Recentelijk is de aandacht voor het stimuleren van het rijden op aardgas (CNG) toegenomen. Vervanging van de ene fossiele brandstof (olie) door een andere (aardgas) heeft echter slechts beperkte voordelen voor het klimaat, de luchtkwaliteit en de voorzieningszekerheid, en dan vooral op de korte termijn. Het lange termijn perspectief van aardgas in mobiliteit moet met name gezocht worden in een transitie naar rijden op groen gas.
- Transitiepad waterstof: op het gebied van stadsbussen kan Nederland via specifieke beleidsmaatregelen (bijvoorbeeld via criteria in de aanbesteding van openbaar vervoer) een markt voor brandstofcelbussen creëren. Parallel daaraan kan de Nederlandse industrie, zoals nu al plaats vindt, gestimuleerd worden een brandstofcel bus te ontwikkelen. Het is hierbij essentieel om de ontwikkeling van de vraag aan te laten sluiten bij de ontwikkeling van het aanbod.
- Transitiepad elektrisch, hybride en plug in hybride: vanwege een hoge bevolkingsdichtheid in combinatie met korte afstanden, kan Nederland een geschikte proeftuin bieden voor groot-schalige demonstratieprojecten voor elektrisch vervoer.
- Transitiepad biobrandstoffen: prioriteer de ontwikkeling van tweede generatie biobrandstoffen naar dieselveelvangers om toepassing in het vrachtverkeer mogelijk te maken. In Europees kader kan Nederland agenderend bezig zijn op het gebied van duurzaamheid van biobrandstoffen en versterking van de landbouw. Ook is het mogelijk om een coalitie te vormen met een aantal Europese landen met als doel het aandeel flexi-fuel voertuigen te verhogen, liefst in Europees verband.
- Transitiepad ICT: de Nederlandse overheid loopt Europees voorop in het invoeren van de kilometerbeprijzing en heeft internationaal een sterke positie op het gebied van hightech systemen en materialen. Dit biedt kansen voor ITS, en andersom heeft Nederland, als dichtbevolkt land, ook belang bij een verdere ontwikkeling van ITS-opties die de doorstroming en veiligheid bevorderen. Het is relatief eenvoudig om hierbij de energiebesparende ITS-opties ook te stimuleren, tenzij een verbeterde doorstroming leidt tot een groei van het verkeersvolume.

10.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Naar aanleiding van de kwantitatieve analyse van de vier transitiepaden en de implicaties voor het te voeren beleid, kan een aantal mogelijke vervolgvragen geformuleerd worden.

- Het perspectief van de eindgebruiker. Twee elementen spelen een rol bij het in perspectief plaatsen van de meerkosten van innovatie in het wegtransport. Ten eerste zullen de meerkos-

ten vanuit dit perspectief gunstiger uitvallen als gerekend wordt met BPM (of kilometerheffing) voor personenauto's, en accijnzen voor brandstoffen, afhankelijk van de ontwikkeling van fiscaal beleid in de komende decennia. Ten tweede is de consument wellicht bereid om meer te betalen voor innovatieve schone technologie omdat die ook comfortwinst oplevert door betere rijprestaties (minder geluid, gelijkmatiger versnellen en optrekken). Er zou een nadere analyse van deze bereidheid gemaakt kunnen worden door deze te vergelijken met de trends in de afgelopen jaren, en te bekijken wat de mogelijke invloed van beleid zou kunnen zijn.

- Overheidskosten innovatiebeleid. De voorgestelde beleidsinstrumenten kunnen een substantiële stijging van de kosten (of gederfde accijnzen) voor de overheid met zich meenemen. Alvorens een transitie actief te gaan stimuleren met een bepaald instrument is het essentieel om de verwachte kostenontwikkeling te kennen. Dit voorkomt dat bij een succesvolle doorbraak, halverwege het traject gestopt moet worden wegens onverwacht hoge kosten, met mogelijk zeer vervelende negatieve consequenties.
- Impact vroegtijdige keuze van Nederlandse overheid. De keuze voor waterstof of elektrisch vervoer als dominante technologie voor de toekomst ligt niet bij de Nederlandse overheid. Bovendien wordt deze keuze nog niet op korte termijn duidelijk. Er kunnen echter initiatieven vanuit de markt zijn waarbij ondersteuning door de overheid wordt gevraagd, zoals grootschalige demonstratieprojecten voor waterstof of plannen om een deel van de Nederlandse markt te gaan voorzien van elektrisch vervoer. Vervolgonderzoek naar de mogelijke voor- en nadelen van vroegtijdige stimulering van initiatieven waarvan nog niet duidelijk is of zij ook de definitieve winnaar worden, kan inzicht geven in mate waarin de Nederlandse overheid zich terughoudendheid of juist voortvarend zou moeten opstellen.
- Andere achtergrondscenario's, met name het effect van een lagere economische groei, en eventuele impact van hogere olieprijsen. Aangezien het gekozen achtergrondscenario uitgaat van een relatief hoge economische groei van 2,9% per jaar en brandstofprijzen die dalen vergeleken bij de gemiddelde prijzen in 2007, zou bekeken kunnen worden in hoeverre deze externe factoren kunnen leiden tot een meer gematigde mobiliteitsontwikkeling en wellicht betere kansen voor alternatieve brandstoffen. Hierbij wordt opgemerkt dat hoge brandstofprijzen niet automatisch een prikkel vormen voor overschakeling naar CO₂-arme brandstoffen, maar ook naar synthetische brandstoffen uit kolen, met alle milieu-effecten van dien.

Afkortingenlijst

| | |
|------------------|---|
| (P)HEV | (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle |
| ACEA | European automobile manufacturers' association |
| AER | Algemene Energieraad |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BPM | Belasting van Personenauto's en Motorrijwielen |
| CCS | Carbon dioxide Capture and Storage |
| CNG | Compressed Natural Gas |
| Coop ITS | Coöperatieve Intelligente Transport Systemen |
| EV | All-electric (Electric vehicle) |
| FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations |
| FFV | Flexi-Fuel Vehicle |
| FT | Fischer-Tropsch |
| H2FC | Waterstof brandstofcelauto (Hydrogen Fuel Cell vehicle) |
| HTAS | High Tech Automotive Systems |
| ICE | Internal Combustion Engine |
| ICT | Informatie- en Communicatie Technologie |
| In car ITS | Intelligente Transport Systemen: apparatuur in de auto |
| ITS | Intelligent Transport Systemen |
| JTI | Joint Technology Initiative |
| LPG | Liquified Petroleum Gas |
| NO _x | Stikstofoxiden |
| PM ₁₀ | Fijnstof |
| R&D | Research & Development |
| SMR | Steam Methane Reforming |
| TPMS | Tyre Pressure Monitoring System |
| WLO-GE HP | Hoge prijs variant van het WLO scenario Global Economy |
| ZEV | Zero Emission Vehicle |

Referenties

- Bakema, G.F. et al. (1990): *Aardgas en elektriciteit bij het gemeentelijk voertuigpark van Amsterdam*, ECN-C--90-045, Petten, oktober 1990.
- Beumer, L. et. al., (2004): *Ketenstudies ammoniak, chloor en LPG: Kosten en baten van vervanging van LPG als autobrandstof*. ECORYS-NEI, Rotterdam, september 2004.
- Biollaz, S., S. Stucki, 2004. *Synthetic Natural Gas/Biogas (Bio-Sng) From Wood As Transportation Fuel - A Comparison With Ft Liquids*. 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy
- Bole, T. en M. Londo (2008): *The changing dynamics between biofuels and commodity markets*. Paper presented at 16th European Biomass Conference and Exhibition, June 2-6 2008, Valencia, Spain.
- BP Statistical Review of World Energy, 2008.
<http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>
- CBS (2004): *Methoden voor de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland t.b.v. Emissie-monitor, jaarcijfers 2001 en ramingen 2002*. Rapportagereeks Milieumonitor, Nr. 13 februari 2004.
- CBS (2007): *Statline - prijzen transportbrandstoffen*.
- CBS (2008): *Basisset emissiefactoren (verbranding) per voertuigklasse*. Centraal Bureau voor de Statistiek, Voorbrug, juni 2008.
- Cotula, L., N. Dyer en S. Vermeulen (2008): *Fuelling exclusion? The biofuels boom and poor people's access to land*. Rome, FAO and IIED.
- CPB/MNP/RPB (2006): *Welvaart en leefomgeving*. Centraal Planbureau/Milieu- en Natuurplanbureau/Ruimtelijk Planbureau, Den Haag/Bilthoven.
- Crutzen, P.J., A.R. Mosier, K.A. Smith en M. Winiwater (2008): *N₂O release from agro-fuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels*. Atmospheric Chemistry and Physics 8: 389-395.
- Dale R., D.R. Simbeck, E. Chang (2002): *Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways - Scoping Analysis 1/22/02-7/22/02*. SFA Pacific, Inc., Mountain View, California, 2002.
- Deurwaarder, E.P., S.M. Lensink, H.M. Londo (2007): *BioTrans biofuels data*. Appendix to 'Use of BioTrans in Refuel'; functional and technical description. Refuel deliverable D10b, April 2007.
- Duvall, M. (2004): *Advanced Batteries for Electric-Drive Vehicles A Technology and Cost-Effectiveness Assessment for Battery Electric Vehicles, Power Assist Hybrid Electric Vehicles, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles*. 1009299 Final Report, EPRI, Palo Alto, California, May 2004.
- EC (2008): *Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources* (presented by the Commission). Brussels, Commission of the European Communities.
- ECN/MNP (2006a): *Potentieelverkenning klimaatdoelstellingen en energiebesparing tot 2020. Analyses met het Optiedocument energie en emissies 2010/2020*. ECN/MNP, ECN-C--05-106/MNP-773001039, Petten/Bilthoven, januari 2006.
- ECN/MNP (2006b): *Optiedocument energie en emissies 2010/2020*. ECN/MNP, ECN-C--05-105/MNP-773001038, Petten/Bilthoven, februari 2005.

- Edwards, R., J.-F. Larivé, V. Mahieu en P. Rouveiroles (2006): *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. 2006 update. Brussels, EUCAR/CONCAWE/JRC.
- EP (2008): Texts adopted at the sitting of Wednesday 17 December 2008; provisional edition. European Parliament, Brussels
- ETRMA (2006): *Tyre & GRG Facts and Figures*; Updated May 2006, ETRMA, Brussels, Belgium, 2006.
- EU (2007a): *Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information*, OJ L 171, 29.6.2007
- EU (2007b): *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles and engines with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI) and on access to vehicle repair and maintenance information* {SEC(2007)1718} {SEC(2007)1720}, COM/2007/0851 final.
- EU (2007c): *Revised proposal for a Directive of the European Union and the Council on the promotion of clean and energy efficient road transport vehicles (presented by the Commission)*. COM(2007) 817 final, Brussels, 19 December 2007.
- EUCAR, CONCAWE en JRC/IES (2007): *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context WELL-TO-TANK Report Version 2c, March 2007* WTT APPENDIX 2 WTT App 2 010307.doc 07/03/07.
- Gallagher, E., A. Berry, G. Archer, S. McDougall, A. Henderson, C. Malins en L. Rose (2008): *The Gallagher Review of the indirect effects of biofuels production*. St Leonards-on-Sea, Renewable Fuels Agency.
- GAVE (2003): *Ligno Cellulosic-Ethanol, A Second Opinion*. Report 2GAVE-3.11, ECN, Petten, mei 2003.
- Hoen, A., R.M.M. van den Brink, J.A. Annema (2006a): *Verkeer en vervoer in de Welvaart en Leefomgeving; Achtergronddocument bij Emissieprognoses Verkeer en Vervoer*. MNP rapport 500076002/2006.
- Hoen, A., Geilenkirchen, G. (2006b): *De waarde van een SUV - waarom de gemiddelde auto in Nederland niet zuiniger wordt*. Milieu- en Natuurplanbureau (MNP). Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2006, Amsterdam, 23 en 24 november 2006.
- Hygate, C. (2007): *Green fuels; Moving to Medium Scale Biodiesel Production*. Biodiesel Expo 2007, Newark Showground, Nottinghamshire, 17 en 18 oktober 2007.
- HyWays (2007): *The European Hydrogen Energy Roadmap*. www.hyways.de.
- HyWays (2007a): *HyWays Action Plan, Policy Measures for the Introduction of Hydrogen Energy in Europe*. www.hyways.de.
- IEA (2008): *Energy Technology Perspectives 2008; Scenarios and strategies to 2050*. Paris, International Energy Agency.
- Kalhammer, F.R., B.M. Kopf, D.H. Swan, V.P. Roan, M.P. Walsh (2007): *Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology*. Report of the ARB Independent Expert Panel 2007. Prepared for State of California Air Resources Board, Sacramento, California.
- Kampman, B., et al. (2005): *A transition to sustainable biomass utilization*. 14th European Biomass Conference and Exhibition: Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Parijs, oktober 2005.
- Lundbaek, J., H. Duer en H.M. Londo (2007): *Report from REFUEL stakeholder workshop 'Barriers and Solutions for EU Biofuels'*. Brussels 6 March 2007. COWI, Lyngby.

- Menkveld, M. et al (2007): *Beoordeling werkprogramma Schoon en Zuinig*. ECN-rapport ECN--E-07-067, in samenwerking met MNP.
- Oostvoorn, F. van, et al. (1998): *SERUM, een model van de Nederlandse raffinage industrie*. ESC-49, ECN/ESC, Petten, oktober 1989.
- Oxfam (2008): *Another Inconvenient Truth; How biofuel policies are deepening poverty and accelerating climate change*. Oxford, Oxfam.
- Passier, G.L.M. (2008a): *Technologisch CO₂-reductie potentieel voor transport in 2040*. TNO-rapport MON-RPT-033-DTS-2008-02880.
- Passier, G.L.M. (2008b): *Concept for an Environmentally Friendly Vehicle (EFV) (Examples)*. (TNO)Working paper No.: EFV-02-05, GRPE Informal Group on EFV, 2nd Meeting, Bonn, 30/31 October 2008 <http://www.unece.org/trans/doc/2008/wp29grpe/EFV-02-05e.pdf>
- Platform Nieuw Gas (2007): *Vol gas vooruit! de rol van groen gas in de Nederlandse energiehuishouding*. SenterNovem, Utrecht, december 2007.
- Provincies Groningen, Drenthe, Friesland en Energy Valley, *Het 100.000 voertuigenplan, duurzaam op weg*, juni 2008.
- Raad voor Verkeer & Waterstaat, VROM-raad, Algemene Energieraad (2008): *Een prijs voor elke reis. Een beleidsstrategie voor CO₂-reductie in verkeer en vervoer*. Januari 2008.
- Schoots, K. en H. Jeeninga (2008): *Innovaties succesvol introduceren*, ESB 4536, 30 mei 2008.
- Searchinger, T., R. Heimlich, R.A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes en T.H. Yu (2008): *Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change*. Science 10.1126/science.1151861.
- Sundsvall (2008): Persbericht: Sundsvall, Sweden to Create Sweden's First Liquid BioGas Filling Station. November 6, 2008. <http://www.scandinaviangts.com/doc/pressrelease%20Sundsvall%20English.pdf>
- Sylvester-Bradley, R. (2008): *Critique of Searchinger (2008) & related papers assessing indirect effects of biofuels on land-use change; a study commissioned by AEA Technology as part of the Gallagher Biofuels Review*. Boxworth, ADAS UK Ltd.
- TNO/IEEP/LAT (2006): *Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂ emissions from passenger cars*. Final Report. Contract number SI2.408212, TNO, Delft, October 31, 2006.
- TWA (2008): Nieuws Special, jaargang 46, nr. 5. <http://www.twanetwerk.nl/>.
- Uyterlinde, M.A., H.M. Londo, P. Godfroi, H. Jeeninga (2007): *Long-term developments in the transport sector - comparing biofuel and hydrogen roadmaps*. ECN-M--07-075, juni 2007.
- Uyterlinde, M.A., C.B. Hanschke, P. Kroon (2008): *Effecten en kosten van duurzame innovatie in het wegverkeer. Een verkenning voor het programma 'De auto van de toekomst gaat rijden'*. ECN-E--07-106, maart 2008.
- Van Arem, B., B. Jansen, M. van Noort (2008): *Slimmer en beter, de voordelen van intelligent verkeer*. TNO 2008-D-R0996/A.
- Verbeek, R., et al. (2008): *Impact of biofuels on air pollution from road vehicles*. MON-RPT-033-DTS-2008-01737, TNO Science and Industry, Delft, 2 juni 2008.
- Vreuls, H.H.J. (2006): *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren*. SenterNovem, Augustus 2006.
- VROM (2008a): *Brief van de minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer*. Tweede Kamer over de komende Milieuraadsvergadering op 5 juni 2008. Vergaderjaar 2007-2008, 21 501-08 Nr. 766 Milieuraad, 22 mei 2008.

Internetbronnen

Dieselnet: <http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>.

Hylights: www.hylights.eu

ITM: <http://www.itm-project.nl/>.

Miles Electric Vehicles: <http://www.milesev.com/>

Tesla Motors: <http://www.teslamotors.com>

Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/General_Motors_EV1

Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Miles_Electric_Vehicles

Xebra: http://www.speedace.info/electric_cars.htm

Bijlage A Overzicht scenario's: Marktaandelen innovaties

Onderstaande tabel geeft voor het referentiescenario en de drie innovatiescenario's de marktaandelen van de diverse innovaties per voertuigtype. Het marktaandeel betreft een opsplitsing van de verkeersprestatie naar brandstof (voor benzine en diesel inclusief biobrandstof). Voor hybrides en plug-in hybrides is de verkeersprestatie niet apart opgenomen. Alleen de elektrische kilometers van de plug-in hybrides (PHEV) zijn apart vermeld. Voor de rest staan de betreffende kilometers onder benzine en diesel. Wel is per zichtjaar het aandeel van hybrides in het diesel en benzine wagenpark opgenomen, inclusief het aandeel van plug-in hybrides daarvan. Ter illustratie: in 2040 is scenario 2 ongeveer 60% van de kilometers van personenauto's gereden door waterstof brandstofcelauto's. De resterende 40% van de kilometers betreft benzine en diesel auto's waarvan 24% (74%*32%) plug-in hybride, 50% (74%-24%) in hybride uitvoering (niet plug-in) en de resterende 26% is niet-hybride. Door verschillen in leeftijdsopbouw kan het aandeel in de verkeersprestatie afwijken van het parkaandeel, maar het geeft wel een redelijke indicatie.

Tabel A.1 *Marktaandelen innovaties in verkeersprestatie per scenario*

| [%] | | Referentie | | | | | Scenario 1 | | | | | Scenario 2 | | | Scenario 3 | | | |
|-------------------|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 2005 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Personenauto's | benzine/bioethanol/E85 | 69 | 57 | 48 | 42 | 42 | 56 | 43 | 34 | 27 | 57 | 45 | 31 | 14 | 57 | 43 | 26 | 16 |
| | (bio)diesel | 26 | 40 | 51 | 56 | 57 | 40 | 48 | 49 | 41 | 40 | 49 | 45 | 20 | 40 | 48 | 43 | 36 |
| | LPG | 5 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| | CNG/biogas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 10 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | H ₂ Fuel Cell | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 20 | 59 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Elektriciteit - PHEV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 19 | 0 | 1 | 3 | 6 | 0 | 4 | 11 | 12 |
| | Elektriciteit - All-electric | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 19 | 34 |
| | Totaal | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| <i>penetratie</i> | Hybride (diesel/benzine) | 0 | 0 | 9 | 18 | 20 | 1 | 39 | 80 | 91 | 1 | 31 | 60 | 74 | 1 | 42 | 85 | 96 |
| <i>waarvan</i> | plug-in hybride | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 15 | 44 | 0 | 5 | 10 | 32 | 0 | 14 | 30 | 39 |
| Bestelauto's | Benzzine | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | (bio)diesel | 95 | 98 | 99 | 99 | 99 | 97 | 89 | 84 | 65 | 97 | 84 | 73 | 30 | 97 | 86 | 65 | 49 |
| | LPG | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | CNG/biogas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 10 | 15 | 17 | 1 | 5 | 1 | 0 | 1 | 5 | 1 | 0 |
| | H ₂ Fuel Cell | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 25 | 64 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Elektriciteit - PHEV | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 1 | 9 | 13 |
| | Elektriciteit - All-electric | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 24 | 36 |
| | Totaal | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| <i>penetratie</i> | Hybride (diesel/benzine) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 25 | 70 | 91 | 1 | 20 | 49 | 71 | 1 | 29 | 72 | 93 |
| <i>waarvan</i> | plug-in hybride | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 0 | 0 | 0 | 29 | 0 | 7 | 27 | 43 |

Tabel A.1 (vervolg) *Marktaandeelen innovaties in verkeerspresentatie per scenario*

| [%] | | Referentie | | | | | Scenario 1 | | | Scenario 2 | | | Scenario 3 | | | | | |
|-------------------|--------------------------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 2005 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Bussen | (bio)diesel | 99 | 99 | 100 | 100 | 100 | 96 | 77 | 63 | 60 | 96 | 71 | 41 | 35 | 96 | 81 | 75 | 75 |
| | CNG/biogas | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 17 | 27 | 30 | 3 | 13 | 8 | 1 | 3 | 13 | 15 | 15 |
| | H ₂ Fuel Cell | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 10 | 10 | 0 | 17 | 50 | 63 | 0 | 6 | 10 | 10 |
| | All-electric | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Totaal | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| <i>penetratie</i> | Hybride (diesel) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 | 58 | 62 | 1 | 24 | 37 | 35 | 1 | 32 | 58 | 62 |
| Vrachtwagens* | (bio)diesel | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | <i>penetratie</i> | Hybride (diesel) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 15 | 19 | 0 | 5 | 15 | 19 | 0 | 5 | 15 | 19 |

* inclusief trekkers.

Bijlage B Achterliggende gegevens

B.1 Technische gegevens

B.1.1 Brandstoffen: emissiefactoren

Emissiefactoren CO₂

Tabel 2.1 bevat de gehanteerde directe en indirecte emissiefactoren. De directe emissiefactoren zijn conform de door de IPCC voorgeschreven emissiefactoren (Vreuls, 2006). De IPCC schrijft geen ketenemissiefactoren⁴³ voor. Deze zijn van de directe emissiefactoren afgeleid op basis van de volgende aannames:

- Benzine en diesel: opslag van 15%.
- LPG en CNG: opslag van 10%.

Voor waterstof is de ketenemissiefactor gelijk gesteld aan 20% van de ketenemissiefactor van benzine. Dit komt overeen met de verwachte emissie indien de productie van waterstof plaatsvindt via stoom reforming van aardgas met CO₂-afvangst en opslag (SMR met CCS).

Voor elektriciteit is de ketenemissiefactor bepaald op basis van elektriciteitsproductie in 2020 in WLO GE scenario, gecorrigeerd voor warmteproductie, import en vuilverbranding en inclusief WKK. Voor de periode na 2020 is het WLO GE scenario aangepast voor een verdere verduurzaming⁴⁴:

- 2020: WLO GE, aandeel duurzaam bijna 20%, geen CO₂-opslag in de elektriciteitssector.
- 2030: WLO GE met correctie voor aandeel duurzaam 30% en 10 Mton reductie door CO₂-opslag in de elektriciteitssector.
- 2040: WLO GE met correctie voor aandeel duurzaam 40% en 15 Mton reductie door CO₂-opslag in de elektriciteitssector.

Voor de biobrandstoffen zijn de ketenemissiefactoren bepaald op basis van de resultaten van REFUEL waarbij de ketenemissiefactor van de biobrandstof bepaald is op basis van het gemiddelde over de dominante feedstocks (Deurwaarder et al., 2007):

- 1^e generatie bioethanol: Maïs, suikerbieten en aantal graangewassen.
- 2^e generatie bioethanol: Resten uit agrarische en hout(verwerkings) sector.
- 1^e generatie biodiesel: Koolzaad- en zonnebloemolie.
- 2^e generatie bio-Fischer Tropsch (FT)-diesel: Houtachtige gewassen.

De ketenemissiefactor van bioethanol en biodiesel is bepaald met de voor de innovatiescenario's veronderstelde verdeling tussen 1^e en 2^e generatie. Het aandeel van 2^e generatie biobrandstoffen stijgt van 17% (2010) via 50% (2020), 67% (2030) naar 75% (2040). Door het gestegen aandeel van 2^e generatie biobrandstoffen, daalt de ketenemissiefactor van CO₂ voor bioethanol en biodiesel. Voor alle overige brandstoffen zijn de emissiefactoren constant verondersteld tussen 2020 en 2040. Het kan zijn dat door verdergaande Europese wetgeving de ketenemissiefactoren lager uit zou kunnen vallen, maar dit is niet meegenomen in deze studie.

Emissiefactoren overige emissies: NO_x, PM₁₀

De emissiefactoren voor NO_x en PM₁₀ voor de huidige Euro-normen (tot en met Euro 4 en Euro IV) zijn in het model opgenomen conform de beschikbare emissiefactoren van (CBS, 2004), (CBS, 2008). De emissiefactoren zijn per wegtype en technologie/brandstofcombinatie vastge-

⁴³ De ketenemissie geeft aan wat de uitstoot van broeikasgassen is inclusief winning, omzetting en transport van de energiedrager.

⁴⁴ Deze aanpak is gekozen omdat in het GE-scenario na 2020 het klimaatbeleid wegvalt. Dit is niet te verwachten in een scenariobeeld met een ambitieuze inzet op innovatie ten behoeve van het klimaatbeleid.

legd en zijn gebaseerd op de zogenaamde praktijk emissiefactoren, die sterk kan afwijken van de norm emissiefactor. Voor waterstof en elektrisch vervoer (inclusief elektrisch gereden kilometers van plug-in hybride) zijn deze overige emissies op 0 gezet. In de literatuur zijn er nog geen goede gegevens gevonden voor de overige emissies van een hybride of een plug-in hybride. We hebben de praktijkemissiefactoren gelijk gesteld aan de praktijkemissiefactor van ICE voertuigen met dezelfde brandstof (diesel of benzine).

Voor de nog in te voeren Euro normen zijn aannames gedaan gebaseerd op de wetsvoorstellen per segment waarbij als vertrekpunt is gehanteerd dat het percentage aanscherping gelijk is aan het percentage lagere emissie⁴⁵. De volgende wetsvoorstellen waren tijdens het opstellen bekend:

- *Personenwagens*: In juni 2007 zijn de definitieve normen voor Euro 5 bekend geworden, en is ook voor Euro 6 een verdere aanscherping van september 2014 vastgelegd (EU, 2007a).
- *Bestelwagens*: De Euro normen voor bestelwagens, met onderverdeling naar gewichtsklasse zijn overgenomen van de internetsite www.dieselnet.com.
- *Autobussen, vrachtauto's en trekkers*: Euro V wetgeving is al enige tijd geleden vastgesteld. De nieuwe emissie-eisen voor Euro VI zijn opgenomen in het voorstel van de EU van eind 2007 (EU, 2007b). Het voorstel is in, mei 2008, nog niet door de milieuministers besproken. Van verschillende kanten is wel aangedrongen op eerdere invoering, maar de standpunten zijn nog verdeeld (VROM, 2008a).

B.1.2 Brandstoffen: energiegebruik

Het gemiddelde energieverbruik per voertuigcategorie/brandstof-combinatie is in het TEMPO-model bepaald in lijn met het WLO GE hoge prijsscenario uit (Hoen et al., 2006a). Daarnaast zijn binnen ECN inschattingen gemaakt voor het gemiddelde energieverbruik van de alternatieve brandstoffen. Zij zijn bepaald door het energieverbruik uit te drukken ten opzichte van het energieverbruik van een referentie fossiele brandstof. Het energieverbruik is inclusief de efficiëntie van de motoren waarmee deze omgezet worden in bewegingsenergie. Per voertuigklasse is het energieverbruik van de alternatieve brandstoffen bepaald met behulp van de volgende aannames:

- CNG:
 - Personen-/bestelwagens: conform energieverbruik benzine.
 - Overige voertuigen: 20% hoger energieverbruik dan diesel.
- Waterstof (lager verbruik in verband met efficiëntere motor (brandstofcel)):
 - Personen-/bestelwagens: gelijk aan 62,5% van het energieverbruik benzine.
 - Overige voertuigen: gelijk aan 87,5% van het energieverbruik diesel.
- Elektriciteit: energetisch gezien een kwart (25%) van het diesel verbruik. Deze factor komt omdat elektriciteit min of meer direct voor aandrijving gebruikt kan worden en diesel eerst nog in de motor omgezet moet worden in aandrijfenergie.

Het daadwerkelijke verbruik per kilometer is vervolgens aangepast voor diverse aspecten van de vervoersprestatie zoals de wegtypeverdeling (stad, streek, autosnelweg).

Het brandstofverbruik is in het model bepaald op basis van het energieverbruik en de gevraagde vervoersprestatie per brandstof. Voor plug-in hybride voertuigen (binnen een brandstofklasse) is één aanvullende aanname nodig over het aandeel van de vervoersprestatie dat gereden wordt met behulp van elektriciteit van het net (dus niet op elektriciteit die de motor heeft gemaakt). Binnen deze studie is aangenomen dat elektriciteit de helft van de vervoersprestatie verzorgt.

Het energieverbruik per kilometer is voor de belangrijkste brandstoffen per voertuigtype bepaald met behulp van de resultaten van de scenario's. De innovatiescenario's hebben door de verschillende uitgangspunten voor de innovatieve technologieën (timing en marktaandeel) een

⁴⁵ Er is in een aantal gevallen verondersteld dat in de toekomst de praktijkemissiefactoren dichter bij de Euro normen zullen liggen.

bepaalde bandbreedte in het energieverbruik. De volgende tabel bevat het energieverbruik voor Scenario 1, aangevuld met gegevens uit Scenario 2 (waterstof) en Scenario 3 (elektriciteit).

Tabel B.1 *Energieverbruik per kilometer per voertuigtype-brandstofcombinatie*

| [MJ/km] | | Referentiescenario | | | | Scenario 1 | | | |
|--------------|---------------|--------------------|------|------|------|------------|------|------|------|
| | | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
| Personenauto | Benzine | 2,6 | 2,2 | 1,9 | 1,9 | 2,6 | 2,0 | 1,6 | 1,5 |
| | Diesel | 2,3 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 2,3 | 1,8 | 1,5 | 1,4 |
| | LPG | 2,3 | 1,9 | 1,7 | 1,7 | 2,3 | 1,9 | 1,6 | 1,5 |
| | CNG | | | | | 2,4 | 2,0 | 1,8 | 1,8 |
| | Elektriciteit | | | | | | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| | Waterstof | | | | | | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| Bestelwagen | Benzine | 3,2 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,0 | 2,8 | 2,7 |
| | Diesel | 3,5 | 3,4 | 3,4 | 3,4 | 3,5 | 3,1 | 2,6 | 2,5 |
| | LPG | 3,0 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 3,0 | 2,7 | 2,6 | 2,5 |
| | CNG | | | | | 3,2 | 2,9 | 2,8 | 2,7 |
| | Elektriciteit | | | | | | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| | Waterstof | | | | | | 1,8 | 1,7 | 1,7 |
| Vrachtwagen | Diesel | 12,1 | 11,9 | 11,9 | 11,9 | 12,1 | 11,5 | 11,0 | 10,7 |
| Autobus | Diesel | 12,2 | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 12,2 | 10,8 | 9,8 | 9,4 |
| | CNG | | | | | 13,5 | 12,8 | 12,3 | 11,9 |
| | Waterstof | | | | | | 9,0 | 8,8 | 8,6 |

Effect verdieseling

Deze paragraaf beschrijft de methode die gebruikt is om de relatieve verandering in het brandstofverbruik te bepalen tussen personenauto's die op benzine rijden en een gelijkwaardige dieselvansie. Deze relatieve verandering is in het TEMPO model gebruikt om de emissiereductie te kunnen bepalen voor de gevoeligheidsanalyse voor verdieseling, zie Paragraaf 3.2.2.

Door ECN is een vergelijking gemaakt van de benzine en dieselvansies van 46 personenauto's die in 2002 verkocht werden. De gemiddelde autoprijs kwam hierbij uit op € 12.700 (€ 19.170 inclusief heffingen) voor een benzine en € 13.310 (€ 21.830 inclusief heffingen) voor een dieselveertuig; een verschil van € 610 (€ 2.660, inclusief heffingen). Het gemiddelde motorvermogen was 74 kW versus 67 kW (diesel 7 kW minder), het gewicht 1.120 kg versus 1.190 kg (diesel 70 kg zwaarder) en het gemiddelde brandstofverbruik, berekend vanuit testritten, bleek bij benzinevoertuigen 19% hoger te liggen (2,33 MJ/km versus 1,89 MJ km). Doordat het aandeel van de stadrit wat zwaarder meetelt in deze weging, dan het aandeel van stadsritten in de Nederlandse verkeersprestatie, is dit verschil wat te hoog.

Uit CBS-cijfers over de verkoop van personenauto's in de periode 1995-2005 kan berekend worden dat dieselveertuig ongeveer 170 kg zwaarder zijn dan benzineauto's. Op basis van de ECN analyse kan geconcludeerd worden dat 70 kg veroorzaakt worden door de zwaardere dieselmotor en 100 kg door andere zaken (diesel gemiddeld luxer). Als een 10% zwaarder voertuig ongeveer 6% meer brandstof verbruikt (Hoen, 2006b), kan berekend worden dat de gemiddelde dieselveertuig, doordat deze 100 kg zwaarder is, ongeveer 5% meer verbruikt. Theoretisch kan een verbruiksverschil tussen benzine- en dieselveertuigen op basis van CBS-cijfers van (19-5=) 14% verwacht worden. In de praktijk (cijfers uit TEMPO voor voertuigen van 1994 tot 2004) blijkt het verschil echter kleiner te zijn en is het maar circa 10%. In de stad is diesel bijna 15% zuiniger, maar op buitenwegen en snelwegen daalt dit verschil fors naar 8 tot 9%.

Voor de verdieselingsvariant zijn de verbruikcijfers van de voertuigen die van benzine naar diesel gaan direct gekoppeld aan die van dieselveertuigen. Dit levert zoals aangegeven direct 10% zuiniger voertuigen op. Hier is nog een extra 5% aan toegevoegd in verband met het lagere gewicht omdat een gemiddeld benzine voertuig in een diesel uitvoering gemiddeld nog 100 kilo

lichter is dan het gemiddelde diesel voertuig⁴⁶. Per saldo is verondersteld dat bij de overgang van benzine naar diesel het verbruik in MJ/km met circa 15% afneemt. Doordat de energie-inhoud van een liter diesel 10% hoger is dan van benzine is het verschil in l/km groter. In CO₂-termen is het verschil juist kleiner, bijna 3%, omdat een MJ diesel meer CO₂ veroorzaakt dan een MJ benzine.

B.1.3 Besparingseffect innovatieve technologieën

Voor iedere energiebesparende technologie is per voertuigtype bepaald hoe groot de verwachte besparing is in het brandstofverbruik.

Tabel B.2 *Besparingseffect innovatieve technologieën op energieverbruik per voertuigtype*

| [%] | Hybride | Zuinige banden | ICT |
|---------------------|---------|----------------|-----|
| Personenwagen | 18 | 3 | 10 |
| Bestelwagen | 18 | 4 | 10 |
| Vrachtwagen | 10 | 4 | 5 |
| Trekker | 10 | 4 | 5 |
| Autobus | 20 | 4 | 7,5 |
| Speciale voertuigen | 10 | 4 | 5 |

Voor zuinige banden is het technische besparingspotentieel voor een voertuig geschat op 4% (ETRMA, 2006). Ruim 40% van de nieuwe personenauto's is met zuinige autobanden uitgerust, mede door bandenvervanging (als de eerste banden versleten zijn) is het aandeel in de praktijk na verloop van tijd minder. Het exacte cijfer hiervoor ontbreekt, maar wordt geschat op 1 op de 4 (25%). Er is voor gekozen om binnen het model de penetratie van deze technologie in de nieuw verkochte personenwagens uit te drukken over het resterende marktaandeel (75%) en in lijn daarmee de maximale besparing aan te passen naar 3%. Een in deze studie gepresenteerd marktaandeel van 50% komt dan dus overeen met een echt marktaandeel van 62,5% en een besparing van 1,5% tegen het achtergrondscenario. Voor ICT en hybrides treedt dit effect niet op omdat daar het huidige marktaandeel verwaarloosbaar is.

De besparing van hybrides voor personen- en bestelwagens is gebaseerd op (TNO/IEEP/LAT, 2006), de overige waarden voor hybride voertuigen en de besparingswaarde van ICT zijn overeengekomen in de werkgroep, waarbij deze laatste gebaseerd is op een indicatie van het Platform Duurzame Mobiliteit. Om de reikwijdte van al deze aannames te bepalen, zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd in de voorgaande studie, zie (Uyterlinde et al., 2008). De netto-besparingseffecten van ICT zijn extra onzeker, omdat er sprake kan zijn van een 'rebound effect'. Dat wil zeggen dat een verbeterde verkeersdoorstroming, als gevolg van intelligente transportsystemen, een groei in de mobiliteit kan veroorzaken. Dit effect is in de berekeningen niet meegenomen.

Indien meerdere technologieën tegelijk in een segment aanwezig zijn, worden de relatieve besparingen met elkaar vermenigvuldigd om de totale besparing te bepalen. Bijvoorbeeld: twee technologieën die elk afzonderlijk 10% zouden besparen, resulteren gezamenlijk in een besparing van $19\% = 1 - 90\% \cdot 90\%$.

B.2 Kostenmethodiek

In de volgende subparagrafen wordt ingegaan op de gebruikte brandstofprijzen en meerkosten van het wagenpark. Daarvoor zal eerst nog een aantal uitgangspunten voor de gehanteerde methode van kostenbepaling beschreven worden.

⁴⁶ Totaal is niet gerekend met 5% extra, maar met 12%. Er is nog 7% toegevoegd in verband met het CO₂-beleid, waarvan verondersteld is dat dit beleid bij benzine voertuigen nog wat extra verbeteringen gerealiseerd kunnen worden (een soort inhaalslag). Deze 7% heeft meer een boekhoudkundige reden.

Voor het bepalen van jaarlijkse kosten is zoveel mogelijk aangesloten bij de nationale kosten methodiek. Bij deze methode worden overdrachten tussen de overheid en consumenten of organisaties, zoals subsidies en belastingen, buiten beschouwing gelaten. Bij brandstofkosten worden daarom accijns en BTW buiten beschouwing gelaten; bij (meer-)kosten van het wagenpark de BTW, de BPM en subsidies.

Om de jaarlijkse (meer-)uitgaven van het wagenpark te vertalen naar jaarlijkse kosten is gekozen voor een afschrijving op basis van een annuïteit met als uitgangspunten een looptijd van 10 jaar en een rente-/discontovoet van 4%, die gebruikt mag worden als vanuit nationale kosten perspectief wordt gekeken.

Om daadwerkelijk de lasten voor de betrokken partijen zoals de consumenten en de overheid te bepalen zullen overdrachten wel degelijk meegenomen moeten worden, en is dus ook een concrete invulling van het beleid noodzakelijk. Dat aspect is bewust buiten de scope van deze studie gehouden en zal verder niet besproken worden.

Qua scope dient nog opgemerkt te worden dat voor kostenberekeningen in de huidige studie brommers en motoren niet meegenomen zijn. Door het zeer kleine volumeaandeel binnen het wegverkeer zal het effect op de uitkomsten verwaarloosbaar zijn indien naar verschillen wordt gekeken.

B.3 Brandstofprijzen

De brandstofprijzen die gebruikt zijn, zijn prijzen exclusief belastingen en heffingen. Gerekend wordt in €₂₀₀₅. Basis is de hoge prijsvariant van de WLO (CPB/MNP/RPB, 2006) waarbij de prijzen in €₂₀₀₀ naar €₂₀₀₅ zijn omgerekend met een (inflatie)factor van 1,135. Uiteindelijk resulteert dit in een aantal basisprijzen (zie Tabel B.3). In de tabel staan voor aardgas en elektriciteit de zogenaamde commodity-prijzen. Afhankelijk van de specifieke situatie van de afnemer komen hier nog distributiekosten en andere kosten bovenop. Zoals al in Paragraaf B.1.1 vermeld, is het WLO GE scenario aangepast na 2020 om qua ambitieniveau van het klimaatbeleid beter aan te sluiten bij het achtergrondscenario voor de innovatiescenario's. De additionele kosten van dit extra klimaatbeleid zijn als opslag op de elektriciteitskosten meegenomen. De gehanteerde opslag is ook opgenomen in Tabel B.3. Deze opslag is niet in de tarieven verwerkt, maar alleen in de resulterende brandstofkosten. De gehanteerde brandstofprijzen die hiermee bepaald zijn en gehanteerd worden staan in Tabel B.4 en Figuur B.1 en worden hieronder verder toegelicht.

Tabel B.3 *Basisprijzen energiedragers*

| [€ ₂₀₀₅ /GJ] | 2005 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
|--|------|------|------|------|------|
| Ruwe olie | 10,7 | 8,0 | 8,0 | 8,7 | 9,5 |
| Aardgas (zonder distributiekosten) | 5,2 | 6,5 | 6,8 | 7,2 | 7,8 |
| Elektriciteit (zonder netwerk en capaciteitskosten) | 14,1 | 16,2 | 17,4 | 14,7 | 16,4 |
| Elektriciteit 's nachts (zonder netwerk en capaciteitskosten) | 10,0 | 12,7 | 13,2 | 10,3 | 12,4 |
| Elektriciteit overdag (zonder netwerk en capaciteitskosten) | 18,7 | 20,0 | 22,0 | 19,4 | 20,9 |
| Kosten extra klimaatbeleid (voor CCS en hoger % duurzaam na 2020) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 2,5 |

Benzine-, diesel- en LPG-prijzen zijn gekoppeld aan de olieprijs. Hierbij is gebruik gemaakt van een meerjarige analyse van het verband tussen de olieprijs en prijs (exclusief accijns en BTW) die feitelijk aan de pomp betaald moet worden. De brandstofprijzen afgeleid uit de hoge prijsvariant van de WLO zijn ongeveer 10% lager dan de gemiddelde prijzen in het jaar 2007.

Voor CNG is gestart met de aardgasprijs voor een middelgrote afnemer. Voor de kosten van het tankstation is onder andere gekeken naar een wat oudere ECN studie (Bakema, 1990) en

naar informatie over recente projecten in Nederland (onder andere van Dutch4). Uiteindelijk is uitgegaan van een noodzakelijke investering van € 300.000 voor een tankstation met twee vulslangen en een capaciteit van 2.000 m³ aardgas/dag (150 personenauto's). Voor onderhoud is uitgegaan van 7% van de investering en als elektriciteitsgebruik voor compressie is 0,2 kWh m³ verondersteld.

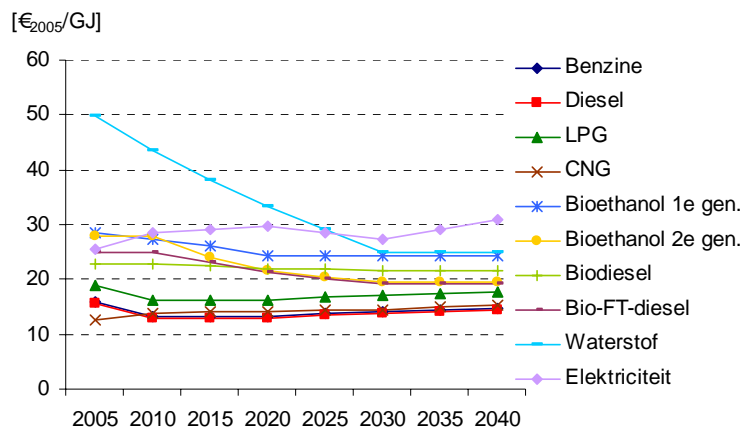
De prijzen voor waterstof zijn overgenomen uit het HyWays project (Hyways, 2007). Deze prijzen hebben in dit project echter meer een indicatief karakter gehad. Aan de hand van andere publicaties (ECN/MNP, 2006a en 2006b), (Dale, 2002) en (Oostvoorn, 1998) is gekeken of deze prijzen, binnen het GE WLO hoge prijzen beeld realistisch zijn. Als uitgegaan wordt van aardgas met CO₂-opslag liggen de prijzen in de range. In de eerste decennia kloppen de prijzen als distributie met tankauto's wordt verondersteld. Daarna kunnen de prijzen dalen als de afzet zodanig hoog wordt dat een waterstof-leidingnet gebruik kan worden.

De prijzen van elektriciteit zijn afgeleid van de elektriciteitsprijzen voor de huishoudsector in het voor deze studie aangepaste scenariobeeld (zie Paragraaf B.1.1). Zonder heffingen verschillen deze niet zoveel van de prijzen voor middelgrote afnemers. Op deze prijzen heeft een correctie plaatsgevonden. Hierbij is verondersteld dat voor circa 50% van de elektriciteit een lager tarief verkregen kan worden in verband met alleen 's nachts opladen.

Voor biobrandstoffen loopt binnen de EU momenteel het REFUEL-project (zie bijvoorbeeld (Lundbaek, 2007)). Probleem van de kostencijfers is dat deze primair gebaseerd zijn op gemiddelde productiekosten en niet op marginale prijzen (zoals bij de andere brandstoffen). Het prijsniveau in dit project wordt sterk beïnvloed doordat (nu nog) goedkope afvalstromen tot biobrandstof verwerkt worden en zo de gemiddelde productiekosten verlaagd worden. Vandaar dat ook gekeken is naar het VIEWLS-project. De ontwikkelingen van de laatste jaren wijzen er echter op dat de prijzen in VIEWLS aan de hoge kant zijn. Uiteindelijk is er voor gekozen om cijfers van berekeningen voor REFUEL te gebruiken en daarbij een correctie voor de grondstofprijzen te hanteren. Voor biodiesel is hiervoor gekeken naar projecties van de IEA en gerealiseerde prijzen in de UK (Hygate, 2007). Voor bioethanol is aangesloten bij de lage waarde die het CE hiervoor noemt (Kampman, 2005). Voor 2^e generatie bioethanol is gebruik gemaakt van het gemiddelde uit dezelfde publicatie. De CE publicatie verwijst hierbij naar een rapport in het kader van het GAVE programma van SenterNovem (GAVE, 2003). Voor Fischer-Tropsch diesel wordt veelal gebruik gemaakt van houtafval uit bossen. In Polen kost dit, afhankelijk van de lokale vraag maar 0,4 tot 1,4 €/GJ; in Oostenrijk kosten houtchips voor houtkachels wel 14 €/GJ. Uiteindelijk is besloten om hier een houtafvalprijs van 3 €/GJ te hanteren. Dit is in de range van een OECD publicatie over Finland en enigszins in lijn met de 4 €/GJ die in het GE-beeld gebruikt wordt voor houtbijstook in kolencentrales.

Tabel B.4 *Gehanteerde brandstofprijzen exclusief heffingen en BTW*

| [€ ₂₀₀₅ /GJ] | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Benzine | 16,0 | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 13,7 | 14,1 | 14,5 | 14,8 |
| Diesel | 15,7 | 13,0 | 13,0 | 13,0 | 13,4 | 13,8 | 14,2 | 14,5 |
| LPG | 19,0 | 16,3 | 16,3 | 16,3 | 16,7 | 17,1 | 17,4 | 17,8 |
| CNG | 12,6 | 13,8 | 14,0 | 14,2 | 14,4 | 14,5 | 14,9 | 15,2 |
| Bioethanol 1 ^e gen. | 28,6 | 27,4 | 26,2 | 24,4 | 24,4 | 24,4 | 24,4 | 24,4 |
| Bioethanol 2 ^e gen. | 27,8 | 27,8 | 24,0 | 21,7 | 20,3 | 19,4 | 19,4 | 19,4 |
| Biodiesel | 22,9 | 22,7 | 22,5 | 22,0 | 21,8 | 21,6 | 21,6 | 21,6 |
| Bio-FT-diesel | 24,8 | 24,8 | 23,1 | 21,3 | 20,0 | 19,2 | 19,2 | 19,2 |
| Waterstof | 49,8 | 43,5 | 38,1 | 33,3 | 29,2 | 25,0 | 25,0 | 25,0 |
| Elektriciteit | 25,4 | 28,4 | 29,0 | 29,6 | 28,4 | 27,2 | 29,1 | 30,9 |



Figuur B.1 Gehanteerde brandstofprijzen exclusief heffingen en BTW

In Paragraaf 3.2.4 is ook een gevoeligheidsanalyse met hogere brandstofprijzen uitgewerkt. Hierbij zijn de brandstofprijzen van alle fossiele brandstoffen verhoogd met 50%. Dit werkt het sterkst door bij waterstof als dit uit aardgas geproduceerd wordt. Ook benzine, diesel en LPG worden vrijwel evenredig duurder. Omdat de prijs van biobrandstoffen slechts voor een beperkt deel aan fossiele brandstof gekoppeld is (kunstmest, transport, hulpstoffen, energieverbruik van de biobrandstof fabrieken) is de doorwerking hier aanzienlijk minder. Per saldo komen de prijzen van fossiel en biobrandstoffen hierdoor dicht bij elkaar te liggen (rekening houdend met de onzekerheden is er zelfs gedeeltelijke overlap). Hierbij is verondersteld dat de hogere fossiel-prijzen geen effect hebben op de bio-grondstofprijzen. Ook zijn er geen veronderstellingen gedaan over een CO₂-prijs die de marktprijs van biobrandstoffen ten opzichte van fossiel brandstoffen kan verhogen. De resulterende brandstofprijzen staan in Tabel B.5.

Tabel B.5 Extra hoge brandstofprijzen voor gevoeligheidsanalyse exclusief heffingen en BTW

| [€/GJ] | 2005 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Benzine | 16,0 | 17,4 | 17,4 | 17,4 | 17,9 | 18,5 | 19,1 | 19,6 |
| Diesel | 15,7 | 17,1 | 17,1 | 17,1 | 17,6 | 18,2 | 18,8 | 19,3 |
| LPG | 19,0 | 20,1 | 20,1 | 20,2 | 20,7 | 21,3 | 21,8 | 22,4 |
| CNG | 12,6 | 17,4 | 17,6 | 17,9 | 18,2 | 18,5 | 19,0 | 19,6 |
| Bioethanol 1 ^e gen. | 28,6 | 29,1 | 27,6 | 25,6 | 25,6 | 25,7 | 25,8 | 25,8 |
| Bioethanol 2 ^e gen. | 27,8 | 28,6 | 24,6 | 22,3 | 20,9 | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| Biodiesel | 22,9 | 23,7 | 23,4 | 22,9 | 22,7 | 22,5 | 22,6 | 22,6 |
| Bio-FT-diesel | 24,8 | 25,5 | 23,7 | 21,8 | 20,5 | 19,8 | 19,8 | 19,8 |
| Waterstof | 49,8 | 48,8 | 43,5 | 38,9 | 34,8 | 30,8 | 31,1 | 31,4 |
| Elektriciteit | 25,4 | 31,0 | 31,7 | 32,3 | 31,0 | 29,6 | 31,6 | 33,7 |

Alle scenario's zijn met deze extra hoge brandstofprijzen doorgerekend om de impact op de jaarlijkse brandstofkosten te bepalen. Voor de rest zijn de scenario's voor deze gevoeligheidsanalyse gelijk gehouden: een gelijke verkeersprestatie en identiek aankoopgedrag van de consument. In werkelijkheid kunnen de scenario's wel degelijk veranderen door een gestegen vraag naar kleinere zuiniger auto's (of hybrides) en eventueel een lager gewenste verkeersprestatie.

Om een gevoel te krijgen hoe deze gevoeligheidsanalyse en de prijzen voor de belangrijkste brandstoffen, benzine en diesel, uit het basisscenario (WLO-GE HP) zich verhouden tot de huidige prijzen, is intern ECN een analyse uitgevoerd. Het doel van de analyse was om beschikbare gegevens van (CBS, 2007) vergelijkbaar te maken met de benzine- en dieselprijs zoals opgenomen in Tabel B.4 en Tabel B.5. Conclusie is dat brandstofprijzen uit 2005 in WLO-GE HP, nagenoeg gelijk zijn aan de gemiddelde prijzen uit 2007 voor benzine en diesel (in reële termen). In het achtergrondscenario dalen de brandstofprijzen van benzine en diesel tot 2030 met onge-

veer 12%, terwijl die in de gevoeligheidsanalyse juist met ongeveer 16% stijgen ten opzichte van 2005 (lees actuele prijs in 2007).

B.4 Basisprijzen referentievoertuigen

In Tabel B.6 zijn de voertuigprijzen opgenomen die als basis in de berekeningen worden gehanteerd. Deze zijn gebaseerd op interne cijfers van ECN die in 2004 zijn verzameld. De ECN-cijfers in €₂₀₀₀ zijn met een inflatiecorrectie vertaald naar €₂₀₀₅. Bij vergelijking bleek dat het prijsniveau van de huidige voertuigen toch iets hoger ligt. Om dit te compenseren is nog een extra prijsstijging van 1% per jaar verondersteld. In principe wordt verwacht dat deze extra prijsstijging (samenhangend met een toenemende luxe en andere extra's van voertuigen) de komende jaren nog wel door kan gaan. Om het prijsbeeld niet te verstoren zijn toch deze voertuigprijzen richting de toekomst in €₂₀₀₅ constant verondersteld.

Tabel B.6 *Basisprijzen van de voertuigen*

| Voertuig | Brandstof | Prijs excl. heffingen en BTW [€ ₂₀₀₅] |
|-------------------|-----------|--|
| Personenauto | Benzine | 15.200 |
| | Diesel | 15.900 |
| | LPG | 17.000 |
| Bestelauto | Benzine | 17.100 |
| | Diesel | 17.900 |
| | LPG | 19.200 |
| Vrachtauto | Diesel | 89.000 |
| Trekker | Diesel | 131.000 |
| Autobus | Diesel | 245.000 |
| Speciaal voertuig | Diesel | 89.000 |

De prijzen van de LPG-voertuigen zijn gebaseerd op die van de benzineversie met een toeslag voor de LPG-installatie inclusief inbouwkosten. Voor de ombouw van een personenauto naar LPG met 3 jaar garantie kan volgens leveranciers een meerprijs van € 2.200 (incl. BTW) en € 1.850 excl. BTW worden aangehouden. De studie van (Beumer, 2004) ligt hier € 100 onder. Voor de ombouw van een bestelauto naar LPG rekent Beumer met € 2.000, als ook hier weer € 100 verschil bij gezet wordt komt de ombouw bij bestelauto's uit op € 2.100.

Voor bestelauto's is ook een benzine- en een LPG-versie opgenomen. In de praktijk worden deze echter nauwelijks nog verkocht. De kosten van de vrachtauto's vallen lager uit dan die van de trekkers, omdat hierin ook kleinere vrachtwagens zijn opgenomen. De prijzen van bussen kunnen sterk uiteenlopen. Een gelede bus of een lage vloer bus, is bijvoorbeeld aanzienlijk duurder dan het hier opgenomen cijfer. Voor speciale voertuigen, een categorie die sterk uiteen loopt, zijn de kosten gelijk verondersteld aan die van vrachtauto's.

B.5 Meerkosten voertuigen

In deze paragraaf zijn kostencijfers voor voertuigen opgenomen. Getracht is om hier een set gegevens te verzamelen en te bepalen die een redelijk consistent beeld geven. De nauwkeurigheid is wel beperkt. Gezien de spreiding die in de kostencijfers aangetroffen is, kan de feitelijke ontwikkeling van de meerprijs in de orde van 30% tot 50% afwijken. Voor de volledigheid kan nog vermeld worden dat tussen productiekosten en verkoopprijs marges in de orde van 30% tot 45% bestaan. Fabrikanten hebben hierdoor de mogelijkheid om bepaalde technologieën al naar gelang de marktsituatie of de situatie in een bepaald land duurder of goedkoper in de markt te zetten. Ook deze marge beïnvloedt het zicht op de feitelijke kostprijsontwikkeling.

Daarnaast is er ook onzekerheid met betrekking tot het feit of er ook voldoende Europees beleid is om innovatie te ondersteunen. Daarom zijn er twee varianten voor de prijsontwikkeling be-

paald. De eerste variant veronderstelt voldoende stimulerend beleid in Europa om sterke kostendalingen mogelijk te maken. Deze variant is gebruikt voor de innovatiescenario's en de gebruikte meerkosten staan in Tabel B.7. De tweede variant veronderstelt dat er geen Europees beleid is, en dat daarmee de kostendalingen beperkter zullen zijn. Deze variant is in deze studie alleen gebruikt voor het referentiescenario, waarbij voor hybride personenauto's, de enige toegepaste innovatieve technologie in dit scenario, een beperktere kostendaling is aangenomen. Tot en met 2010 zijn de meerkosten gelijk aan de eerste variant, maar in 2020 dalen de meerkosten slechts naar € 3.200, om via € 2.600 in 2030 op € 2.300 te eindigen in 2040.

Tabel B.7 *Meerkosten innovatieve technologieën per voertuigtype voor innovatiescenario's*

| Innovatieve technologie | Meerprijs voertuigtype [€ ₂₀₀₅] | 2005 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |
|-------------------------|---|-----------|--------|--------|--------|--------|
| Hybride | Personenauto | 6.000 | 4.400 | 2.500 | 2.000 | 1.800 |
| | Bestelwagen | 10.000 | 8.600 | 3.600 | 2.900 | 2.600 |
| | Vrachtwagen | 120.000 | 60.000 | 25.000 | 20.000 | 18.000 |
| | Trekker | 120.000 | 60.000 | 30.000 | 25.000 | 22.000 |
| | Autobus | 120.000 | 60.000 | 30.000 | 25.000 | 22.000 |
| Plug-in hybride | Personenauto | 16.000 | 12.400 | 6.500 | 5.000 | 4.500 |
| | Bestelwagen | 23.000 | 21.600 | 8.800 | 6.800 | 6.200 |
| Waterstof | Personenauto - Benzine | 50.000 | 8.000 | 4.500 | 3.000 | 2.500 |
| | Bestelwagen - Diesel | 50.000 | 10.000 | 6.600 | 4.200 | 3.500 |
| | Autobus | 1.000.000 | 60.000 | 40.000 | 30.000 | 26.000 |
| CNG | Personenauto - Benzine | 3.000 | 2.500 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |
| | Bestelwagen - Diesel | 4.000 | 3.500 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |
| | Autobus | 45.000 | 25.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 |
| Elektrisch | Personenauto - Benzine | 15.000 | 11.000 | 5.000 | 3.500 | 2.900 |
| | Bestelwagen - Diesel | 18.000 | 14.000 | 6.500 | 4.500 | 3.800 |

Voor een onderbouwing van bovenstaande meerkosten, zie (Uyterlinde et al., 2008), waarbij het jaar 2040 is toegevoegd op basis van een vergelijkbare methode of bron. Voor elektrische voertuigen waren de meerkosten echter nog niet bepaald, en is de onderbouwing in de volgende paragraaf gegeven.

B.5.1 Kosten van elektrische voertuigen

Van een paar sportief ogende zeer luxe elektrische voertuigen met een concurrerende range zijn prijzen aangetroffen met een concurrerende range. De ZAPX moet in 2010 tegen \$ 60.000 op de markt komen (site Xebra) en de Tesla roadstar 2009 kost volgend jaar \$ 109.000 (in Europa € 99.000). De eerste heeft een range van 560 km de tweede van 350 km. Deze voertuigen concurreren wat uitvoering betreft in het zeer dure marktsegment. De voertuigen hebben wat weg van hun illustere voorganger de EV1 van General Motors uit de jaren 90. Deze auto, eerst met lood accu en later met Nikkel Methaalhydride accu, had toen volgens Wikipedia⁴⁷ een prijskaartje van \$ 40.000 (en productiekosten inclusief ontwikkeling van het dubbele).

Op dit moment wordt de XS500 ontwikkeld door Miles Electric Vehicles. De XS500 is sterk vergelijkbaar met een normale gezinsauto en moet tussen de \$ 35.000 en \$ 39.000 kosten met lithium ion accu's en een 'acceptabele' range van circa 200 km (120+ miles). De accu's gaan naar verwachting 100.000 miles mee. Miles maakt op dit moment alleen elektrische 40 km/h voertuigen. Een elektrisch voertuig in beperkte productie kost dus circa 2 keer zoveel als een auto met een verbrandingsmotor

Door de EPRI is in 2004 een detail studie gedaan (Dufall, 2004) naar een elektrische stadsauto met een range van 64 km. De meerkosten ten opzichte van een gewone auto komen uiteindelijk

⁴⁷ Elektrische auto's hebben wereldwijd veel belangstellenden. Informatie op Wikipedia over dit onderwerp blijkt heel goed te kloppen met andere bronnen (zoals de producentensites).

uit op \$ 4.300 (exclusief accu toch nog bijna \$ 1.600 duurder dan een auto met verbrandingsmotor). De levensduur van de accu's hangt sterk af van het aantal ontladingen en de diepte ervan. Gesproken wordt over 50.000 miles garantie, maar 100.000 wordt ook gevonden. Uiteindelijk neemt EPRI 150.000 miles aan. Over een periode van 10 jaar wordt verwacht dat de elektrische auto de helft aan onderhoudskosten heeft \$ 2.200 versus \$ 4.400. Voor vervanging van het (nikkel metaalhydride) accupakket bij een verwachtingsprijs voor 2013 moet met $300 * 9,1 \text{ kW} = \$ 2.700$ rekening worden gehouden. Ofwel 1 keer accu vervangen is ongeveer evenveel als uitgespaard onderhoud. Stel dat het voertuig een drie keer zo grote range zou moeten hebben, en er verder beperkt extra kosten zijn (stel \$ 300), dan lopen de meerkosten op tot $4.300 + 2 * 2.700 + 300 = \$ 10.000$. Rekening houdend met de euro/dollar koers zou dit in euro circa 10% minder zijn. Deze € 9.000 zal voor 2013 worden aangenomen. In 2010 komt de meerprijs dan nog rond de € 11.000.

Centrale kostenpost in de meerprijs van de elektrische auto zijn de kosten van de accu. De levensduur van een accu kan verbeterd worden door het niet te snel te ontladen (geen ontladingspieken). Zogenaamde supercapacitors zijn in staat om, opgeladen door de accu, snelle vermogenswisselingen mogelijk te maken. Verder zijn snelladende accu's in het voordeel, omdat er mee onderweg 'getankt' kan worden. Als eigenaren een kortere actieradius accepteren komt de meerprijs ook in 2010 al onder de € 11.000 uit.

Uitgaande van de € 9.000 voor 2013 is er een productieschaal factor gezet op € 4.000 in de prijs van het voertuig. Ook is in de prijs van het accupakket (geschat op € 7.300 in 2013) de accu ontwikkeling bij plugin voertuigen verwerkt. Tenslotte is er nog een stelpost toegevoegd van € 500 voor extra voorzieningen in het voertuig voor bijvoorbeeld voertuig identificatie bij laadpalen. Voor bestelauto's zijn de meerkosten met 1,3 vermenigvuldigd. Uiteindelijk zijn de cijfers in Tabel B.8 afgerond.

Tabel B.8 *Meerkosten elektrisch voertuig bij personen en bestelauto's*

| Jaar | Meerprijs bij hoge innovatie Personenauto's [€ ₂₀₀₅] | Meerprijs bij lage innovatie Personenauto's [€ ₂₀₀₅] | Meerprijs bij hoge innovatie Bestelauto's [€ ₂₀₀₅] | Meerprijs bij lage innovatie Bestelauto's [€ ₂₀₀₅] |
|------|--|--|--|--|
| 2005 | 15.000 (stelpost) | 15.000 (stelpost) | 18.000 (stelpost) | 18.000 (stelpost) |
| 2010 | 11.000 | 11.000 | 14.000 | 14.000 |
| 2020 | 5.000 | 8.000 | 6.500 | 10.500 |
| 2030 | 3.500 | 6.500 | 4.500 | 8.500 |
| 2040 | 2.900 | 5.900 | 3.800 | 7.700 |

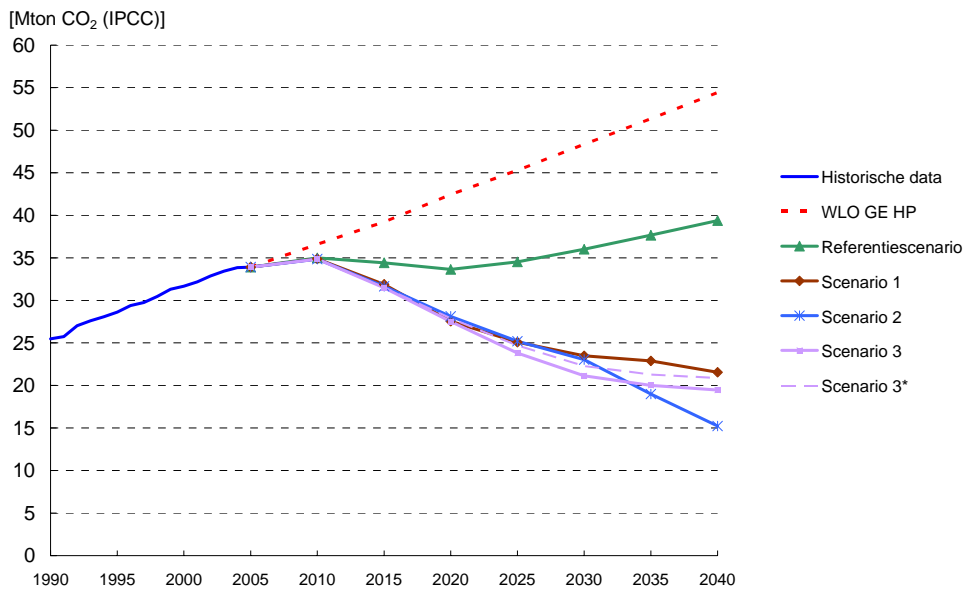
In de meerkosten van Tabel B.8 is de prijs van het accupakket bepalend. De onzekerheid hierin is groot, zowel in de prijs als in de range en de laadsnelheid. Bij het bepalen van de meerkosten is verondersteld dat de elektrische personenauto in 2010 tenminste een range van 200 km moet hebben. Voor langere ritten zijn er meerder opties denkbaar. Men kan de accu's onderweg wisselen, accu's gebruiken die snel geladen kunnen worden, hybride voertuig gebruiken (huren of andere auto van het gezin), een aanhanger/caravan met brandstofcelmotor aankoppelen, etc..

Bijlage C Innovatiescenario's: IPCC-reductiepotentieel

Zoals reeds toegelicht in Paragraaf 2.1 zijn de resultaten in deze studie gebaseerd op ketenemissies voor het Nederlandse brandstof verbruik. In internationaal verband worden Nederlandse emissies beoordeeld op basis van de directe CO₂-emissies conform de IPCC-methode. Voor de sector transport moet de in Nederland verkochte brandstof als basis gebruikt worden. Indirecte emissies worden meegeteld in het land waar die plaatsvinden en niet toegerekend aan de transportsector. Voor biobrandstoffen geldt verder dat zij koolstofneutraal verondersteld zijn omdat de CO₂ die vrijkomt bij de verbranding elders bij de productie aan de atmosfeer onttrokken is.

Er zijn diverse redenen waardoor het Nederlandse brandstof verbruik afwijkt van de in Nederland verkochte brandstof. Het Nederlandse verbruik is het een schatting (geschatte leeftijdopbouw van het Nederlandse wagenpark, geschatte verkeersprestatie, geschatte uitsplitsing naar jaargang en wegtype). Naast de verkeersprestatie is ook een gemiddeld verbruik geschat per voertuigcategorie/jaargang/wegtype combinatie. Naast deze onzekerheid, is de in Nederland getankte brandstof ook niet altijd in lijn met de in Nederland verreden kilometers. Door verschillen in de accijns en overige belastingen, is het rond de grens bij België en Duitsland vaak aantrekkelijk om voor Nederlanders in het buitenland te tanken (benzine) of omgekeerd (diesel).

Voor de jaren na 2005 zijn de volgende factoren gehanteerd om het Nederlandse brandstof verbruik om te rekenen naar de verwachte Nederlandse brandstof afzet: Diesel +12,5%; Benzine - 7,6%; LPG +23%. Voor de alternatieve brandstoffen (CNG, H₂, elektriciteit) is geen correctie factor gebruikt, op basis van de aanname dat de ontwikkelingen in het buitenland op innovatiebeleid een gelijke voortgang hebben en er geen grote prijsverschillen ontstaan. Voor biobrandstoffen zijn de oorspronkelijk voor benzine en diesel gehanteerde correctiefactoren gebruikt.



Figuur C.1 Directe CO₂-emissiewegverkeer (IPCC-methode)

Figuur C.1 toont de CO₂-emissie voor het wegverkeer conform de IPCC-methode. De resultaten zijn redelijk vergelijkbaar met de resultaten op basis van de in het rapport gehanteerde methode. Het voornaamste verschil is dat alle scenario's een aanzienlijk lager emissieniveau behalen. Hiervoor zijn twee redenen: biobrandstoffen (geen emissies onder IPCC) en indirecte emissies (niet meegenomen bij IPCC). Op basis van de IPCC-methode, slagen de innovatiescenario's er iets eerder in om op het 1990 niveau te komen (rond 2025 in plaats van rond 2030).

Bijlage D TNO Review

Deze bijlage bevat de bevindingen van de door TNO uitgevoerde review op de kwantitatieve aspecten van deze studie, zoals vastgelegd in (Passier en Verbeek, 2008)⁴⁸.

Samenvatting

De ECN studie “Duurzame Innovatie voor het Wegverkeer” is consistent en zorgvuldig onderbouwd, gegeven de gehanteerde uitgangspunten en scenario’s. Het is belangrijk om op te merken dat geen van de gehanteerde scenario’s het totale CO₂ reductie potentieel van een combinatie van alle mogelijke innovatieve technologieën weergeeft.

Daarnaast zijn mogelijkheden voor verbetering van de efficiency (zowel voor het voertuig als geheel als voor de aandrijving) niet volledig meegenomen. TNO denkt dat juist hier een grote CO₂ reductie tegen lage kosten mogelijk is. Het aandeel (full) hybride lijkt erg hoog ingeschat. Voor de meerkosten van innovatieve technologieën is een goede overall inschatting gemaakt, vooral wat betreft de langere termijn. Op korte termijn (2010) schat TNO de meerkosten van elektrische en brandstofcelvoertuigen echter veel hoger in. De kosten van de waterstof infrastructuur worden wellicht onderschat door ECN.

Voor de gehanteerde scenario’s geldt dat ECN de totale CO₂ reductie als gevolg van de inzet van biobrandstoffen en waterstof volgens TNO erg gunstig inschat. Daarentegen is de ECN inschatting van de totale CO₂ reductie als gevolg van elektrificatie realistisch of wellicht iets aan de lage kant. Hierbij is gekeken naar het marktaandeel, de CO₂ emissiefactoren en het relatieve energieverbruik.

1 Inleiding

De achtergrond van deze notitie is als volgt: mede op basis van de studie door ECN getiteld “Effecten en kosten van duurzame innovatie in het wegverkeer”⁴⁹, heeft TNO voor het ministerie van Verkeer en Waterstaat een studie gedaan naar de technische mogelijkheden voor CO₂ reductie in 2040⁵⁰. Recent heeft ECN een aanvulling gemaakt op de eerdere studie, getiteld “Duurzame Innovatie voor het Wegverkeer”⁵¹, waarin nu ook naar 2040 wordt gekeken. Vanuit het ministerie van VROM is, in overleg met het ministerie van Verkeer en Waterstaat, het verzoek gekomen om -in het kader van ATE contract met TNO- de ECN studie te reviewen.

De doelstelling van deze notitie is dan ook een review van het rapport “Duurzame Innovatie voor het Wegverkeer”, waarbij met een kritische blik naar de door ECN gehanteerde methodiek, uitgangspunten en aannames is gekeken met het doel om deze objectief te beoordelen. De hoofdstukken waarin de consequenties voor beleid zijn beschreven vallen niet onder de scope van deze review.

Specifiek zijn de volgende drie vragen beantwoord:

1. Is de gehanteerde methodiek correct?
2. Zijn de gehanteerde uitgangspunten voor de gebruikte innovaties in orde?
3. Zijn er kanttekeningen bij de ontwikkeling binnen de scenario’s (vanuit het scenariobeeld bekeken, dus met een hoog ambitieniveau voor klimaat- en innovatiebeleid)?

2 Methodiek

ECN heeft gebruik gemaakt van het eigen TEMPO model voor de berekening van de kosten en CO₂ reductie potentieel per technologie. Dit model hanteert een gestructureerde methodiek voor het berekenen van de effecten van nieuwe technologie in de transport sector. In het TEMPO model wordt de vervanging van het wagenpark en ontwikkeling van kosten voor nieuwe technologieën consistent

⁴⁸ TNO-review van de ECN-studie ‘Duurzame Innovatie voor het Wegverkeer’, G.L.M. Passier en R. Verbeek, MON-MEM-033-2008-04148, 23 december 2008.

⁴⁹ Effecten en kosten van duurzame innovatie in het wegverkeer, M.A. Uytendinck et al. ECN-E-07-106, maart 2008.

⁵⁰ Technologisch CO₂ reductie potentieel voor transport in 2040, G.L.M. Passier et al., MON-RPT-033.DTS-2008-02880, 22 september 2008.

⁵¹ Deze review is gebaseerd op het concept document: Instrumentatie van Innovatie voor het Wegverkeer, ECN-E-08-076 CONCEPT 10 november 2008.

gemodelleerd. TNO kan zich tevens vinden in de keuze om naar de CO₂ uitstoot van well-to-wheel te kijken (in tegenstelling tot het eerdere ECN rapport waar naar tank-to-wheel emissies werd gekeken).

TNO heeft wel de volgende opmerkingen:

- *Transitie scenario's geven geen totaal plaatje*

ECN heeft ervoor gekozen om in elk scenario wel verschillende innovaties tegelijk toe te passen, maar een innovatie te laten domineren. Hierdoor geeft elk van de scenario's weliswaar een goed beeld van de potentie van de dominante innovatie (omdat er door overlap en interactie tussen opties altijd minder totaal reductie mogelijk is), maar wordt niet duidelijk hoeveel CO₂ reductie er door toepassing van een combinatie van alle innovaties mogelijk is. Hierdoor schat ECN de totale CO₂ uitstoot in 2040 relatief hoog in.

- *Innovaties kunnen afhankelijk zijn van het wegtype*

De penetratie (het aandeel) van innovatieve technologieën in de verkopen en in het wagenpark zijn in de studie door ECN gebaseerd op voertuigaantallen. Deze worden vervolgens omgerekend naar een aandeel in de totale voertuigkilometers. Ondanks dat deze methode op zichzelf correct is, wordt er geen rekening gehouden met de mogelijkheid dat sommige innovaties vooral op een bepaald wegtype worden ingezet (bv. elektrisch vervoer zou meer in de stad gebruikt kunnen gaan worden).

Conclusie:

Deze studie van ECN is consistent en zorgvuldig onderbouwd, gegeven de gehanteerde uitgangspunten en scenario's. Het is belangrijk om op te merken dat geen van de gehanteerde scenario's het totale CO₂ reductie potentieel van een combinatie van alle innovatieve technologieën weergeeft. Er is voor de toepassing van innovatieve technologieën geen onderscheid gemaakt naar gebruik of wegtype.

3 Uitgangspunten

De door ECN gehanteerde uitgangspunten zijn duidelijk beschreven. TNO heeft wel de volgende opmerkingen ten aanzien van:

Efficiencyverbetering voertuig en aandrijflijn

Voertuigen met conventionele aandrijving

ECN gaat uit van een beperkte ontwikkeling van het voertuig met benzine en dieselmotor:

- Voor banden is alleen verbetering door lage rolweerstand meegenomen (3% CO₂ reductie), echter door bandenspanning monitoring is een extra besparing mogelijk (van 2.5%); deels wel meegenomen onder de noemer besparing door ICT.
- Alleen de efficiencyverbetering door CO₂ normering van personenauto's is meegenomen (aanname: 130 g/km in 2015. Daarna neemt wel het aantal hybride aandrijvingen sterk toe tot een aandeel van bijna 100% in 2040. TNO schat in dat tot 2040 een verdere efficiency verbetering plaatsvindt.
- Bij bestelauto's en vrachtauto's gaat TNO uit van een maximale verbetering van 40% - 50% in 2040, terwijl ECN uitgaat van ca 20% verbetering.
- Reductie percentage energiebesparende ICT van 10% is 'best-guess' op dit moment. Ook het aandeel energiebesparende ICT (100% vanaf 2030) lijkt een reële inschatting.

Voertuigen met hybride aandrijving

Aangezien voertuigen met elektrische en brandstofcelaandrijving relatief meer voordelen bieden op de kortere afstand met een meer dynamisch gebruik, is het waarschijnlijk dat voertuigen met een conventionele aandrijflijn vooral ingezet worden op de langere afstand. Hybride systemen (met energieopslag) zijn dan waarschijnlijk niet meer de meest optimale en kosteneffectieve optie om het energieverbruik te verminderen. TNO ziet voor het gebruik op de buitenweg en de snelweg, voor zowel personenauto's als vrachtwagens, een vergaande down-sizing van de motor en waste-heat recovery om het energieverbruik te verminderen. ECN gaat uit van bijna 100% hybride aandrijvingen,

terwijl TNO juist verwacht dat de toepassing van volledige hybride aandrijvingen zal dalen, naarmate elektrische en/of brandstofcelvoertuigen een groter marktaandeel krijgen. Micro-hybrides zoals stationair afschakeling ziet TNO wel algemeen toegepast gaan worden.

Conclusie

ECN schat totale CO₂ reductie als gevolg van energiebesparende ICT realistisch in. Echter, de mogelijkheden voor verbetering van de efficiency (zowel voor het voertuig als geheel als voor de aandrijving) zijn niet volledig meegenomen door ECN. TNO denkt dat juist hier een grote CO₂ reductie tegen lage kosten mogelijk is. Het aandeel (full) hybride lijkt erg hoog is ingeschat; dit compenseert voor een deel.

CO₂ emissiefactoren per brandstoftype

In de tabel hieronder is een vergelijking gemaakt van de well-to-wheel CO₂ emissies per ‘getankte’ energie eenheid:

| WTW CO₂ [g/MJ tank] in 2040 | Berekening ECN | Inschatting TNO |
|---|-----------------------|------------------------|
| Biobrandstoffen | 15 | 25 |
| Elektriciteit | 83 | 120 |
| Waterstof | 17 | 75 |

Voor biobrandstoffen komt dit door een hoog aandeel 2^{de} generatie; voor elektriciteit door de aangenomen ontwikkeling van het elektriciteitspark (groter aandeel duurzame energie-opwekking); en voor waterstof door de aanname dat Carbon Capture and Storage (CCS) toegepast zal worden bij de productie.

Conclusie

ECN heeft in haar berekeningen de CO₂ emissiefactoren relatief gunstig ingeschat.

Meerkosten van innovatieve technologieën

Basisprijzen voertuigen

TNO is het globaal eens met de basisprijzen voor voertuigen. Het kan zijn dat de meerkosten voor LPG voertuigen wat dalen, omdat TNO een trend verwacht naar affabriek systemen. De meerkosten zijn gerelateerd aan de seriegroottes en kunnen wat lager zijn dan die van retrofit.

Meerkosten innovatieve voertuigen

TNO is het over het algemeen eens met de meerkosten van de innovatieve voertuigen, zoals deze voor 2040 zijn gedefinieerd (tabel B.6). Er is dan sprake van (grootschalige) seriefabricage van de innovatieve technologieën. De volgende kanttekeningen worden gemaakt voor 2040:

- Elektrisch voertuig in 2040: meerkosten maximaal op het genoemde niveau van EUR 2900 tot 3800 (personenauto resp. bestelauto). De meerkosten zouden uiteindelijk ook nihil kunnen zijn ten overstaan van de conventionele aandrijflijn.
- Waterstofauto in 2040: Volgens TNO minimaal op het niveau van elektrisch maar wellicht wat duurder vanwege de extra componenten zoals de brandstofcel en het tanksysteem. Dit wordt niet helemaal gecompenseerd door de kleinere accu.
- Hybride systemen voor vrachtwagens en trekkers in 2040: Deze kosten worden wat lager ingeschat dan de genoemde EUR 22000. TNO schat deze kosten op maximaal ca EUR 13000. Voor de autobus (OV bus) is TNO het eens met de genoemde EUR 22000. De seriegroottes zijn bij bussen kleiner en het aantal varianten groter. Voor de lange-afstand truck is TNO van mening dat een hybride aandrijving niet effectief is. Hierbij verwacht TNO dat vooral veel voordeel gehaald wordt aan minimalisatie van wrijvingsverliezen, verbeterde hulpaggregaten en waste-heat-recovery. De kosten hiervan worden lager ingeschat dan die van hybride.

Voor de 2010 situatie heeft TNO een duidelijke andere visie op de meerkosten.

- Meerkosten van plug-in hybride kunnen relatief laag zijn: EUR 5000 - 10000 voor personenauto's (ECN: EUR 12400).

- Meerkosten elektrische en waterstofvoertuigen zijn dan naar verwachting nog heel groot vanwege de dure accu en het brandstofcelsysteem. Meerkosten meer in de range van EUR 50.000 tot EUR 80.000.

Waterstof infrastructuur

TNO schat de kosten voor een landelijk dekkende waterstofinfrastructuur op minimaal enkele honderden miljarden. ECN lijkt hiervoor een lagere schatting te hebben gehanteerd.

Conclusie

Overall goede inschatting van de meerkosten van innovatieve technologieën vooral op de langere termijn. Op korte termijn (2010) schat TNO de meerkosten van elektrische en brandstofcelvoertuigen veel hoger in. De kosten van de waterstof infrastructuur worden wellicht onderschat.

4 Scenario 1: Generiek / Biobrandstoffen

In dit scenario wordt een maximale inzet van biobrandstoffen verondersteld, gecombineerd met aardgas en (plug-in) hybride, maar geen waterstof. TNO heeft hierbij de volgende opmerkingen:

- Het totale aandeel biobrandstoffen (22-33% in 2040) is zelfs bij een maximale inzet erg hoog ingeschat (mede gezien de discussie over duurzaamheidscriteria).
- Het aandeel 2^{de} generatie is hoog ingeschat (2020: 50%, 2030 66%, 2040: 75% van de biobrandstof hoeveelheid).
- Het reductie percentage voor biobrandstoffen is hoog ingeschat, met name voor de 2^{de} generatie (1^e generatie: 60% reductie van CO₂, 2^{de} generatie: 90% reductie CO₂).

Conclusie

ECN schat de totale CO₂ reductie als gevolg van de inzet van biobrandstoffen erg gunstig in. TNO is van mening dat de 2^{de} generatie er alleen dan gaat komen, als er keiharde regels komen zoals bv. een prijsgarantie of een verplicht percentage bijmenging van 2^{de} generatie biobrandstoffen.

5 Scenario 2: Waterstof

In dit scenario wordt een maximale inzet van waterstof verondersteld (gecombineerd met biobrandstof, maar zonder elektrisch vervoer). TNO heeft hierbij de volgende opmerkingen:

- Het aandeel waterstof is hoog ingeschat (60% voor zowel personenauto's, bestelauto's als bussen), zelfs als wordt aangenomen dat waterstof op korte termijn doorbreekt. TNO ziet met name beperkingen (of op zijn minst nog een lange weg te gaan) voor het ontwikkelen van de infrastructuur.
- De gevoeligheidsanalyse voor de WTW CO₂ getallen is erg verhelderend (hierbij wordt als worst case uitgegaan van waterstof gemaakt uit aardgas via Methane Steam Reforming met een well-to-wheel CO₂ uitstoot van 100 g CO₂/MJ). Echter, bij de berekeningen kiest ECN voor een zeer lage WTW CO₂ emissie (op basis van volledig duurzame opwekking door CCS of wind/zonne-energie, met een well-to-wheel CO₂ uitstoot van 10-17 g CO₂/MJ).

Conclusie

ECN schat de totale CO₂ reductie als gevolg van de inzet van waterstof erg gunstig in.

6 Scenario 3: Hybride, plug-in hybride en elektrisch vervoer

In dit scenario wordt een maximale inzet van elektriciteit als energiedrager verondersteld, gecombineerd met biobrandstof, maar zonder waterstof. TNO heeft hierbij de volgende opmerkingen:

- Het aandeel (full) hybride is erg hoog ingeschat (74-96%).
- Het aandeel elektrisch vervoer is gebaseerd op voertuigaantallen, niet op voertuigkilometers of op basis van het gebruik (bv. wegtype verdeling).
- Alleen in scenario 3a (all-electric) schat ECN een met TNO overeenkomstige aandeel elektrisch (40% in 2040); in de andere scenario's is het aandeel elektrisch fors minder.

Conclusie

ECN inschatting van de totale CO₂ reductie als gevolg van elektrificatie is realistisch of wellicht iets aan de lage kant.

7 Discussie

TNO benadrukt (evenals ECN) dat een transitie naar elektrisch en zeker naar waterstof een enorme inspanning zal vergen en dat er nog nauwelijks significante stappen in die richting gezet worden. Bij alle transitiepaden en innovatieve technologieën bestaat nog grote onzekerheid. Daarom lijkt voorlopig de grootste CO₂ reductie te halen door in te zetten op een combinatie van verschillende innovatieve technologieën.

Bijlage E ECN-reactie op TNO review

Deze bijlage bevat de reactie op de TNO review, zoals vastgelegd in (Hanschke en Kroon, 2008) ⁵².

Algemeen

De review door TNO⁵³ biedt een waardevolle aanvulling bij het lezen van de ECN-studie 'Duurzame Innovatie in het Wegverkeer'. ECN is tevreden met de uitkomst van de review en kan zich grotendeels in de geplaatste kanttekeningen vinden. Doordat de studie is opgezet met het doel de vier transitiepaden Duurzame Mobiliteit te evalueren, is een aantal keuzes bewust gemaakt om de scope te beperken. De review geeft een aantal mogelijke verbeterpunten c.q. vervolgstappen aan en een aantal verschillen van inzicht met betrekking tot de gebruikte uitgangspunten. Onderstaand volgt een korte reactie van ECN met betrekking tot de belangrijkste verschilpunten, voor zover die niet reeds voldoende onderbouwd zijn in het rapport.

Aanpak studie: beperkt aantal innovaties en drie scenariobeelden

TNO stelt dat ECN het totale CO₂-reductiepotentieel van een combinatie van innovaties onderschat. ECN stelt dat de drie scenario's al behoorlijk aan de grens zitten van wat mogelijk geacht kan worden, maar onderschrijft dat er nog additionele besparing mogelijk is door middel van innovaties zoals kleinere motoren of warmteterugwinning. Bij de start van de studie is het accent gelegd op de technologieën die centraal staan in het programma 'De auto van de toekomst gaat rijden' en de vier transitiepaden Duurzame Mobiliteit. Een deel van de opmerkingen van TNO heeft met dit punt te maken.

Uitgangspunten studie: kosten

TNO heeft een afwijkende inschatting van de meerkosten voor 2010. Deze kosten zijn in het ECN-rapport wel vermeld, maar spelen geen directe rol in de berekeningen, aangezien de betreffende innovaties pas na 2015 penetreren. De kosten zijn gerelateerd aan de productievolumina. Indien de volumina in 2010 lager uitvallen zullen de kosten in dat jaar inderdaad hoger zijn.

Wat betreft de opbouw van de waterstofinfrastructuur gaat ECN uit van een start met gasvorming transport (drukcilinders) of tankauto's met vloeibare waterstof. Pas bij voldoende penetratie wordt distributie per pijpleiding overwogen. Bij dit laatste kan het huidige waterstofgasnet, van Europoort tot Noord Frankrijk, een belangrijk aanknopingspunt vormen. Gezien de zeer hoge kosten die TNO hier noemt verdient het aanbeveling om hier separaat een studie naar te doen.

Uitgangspunten studie: emissie reductiepotentieel

Het model van ECN biedt de mogelijkheid om innovaties per wegtype te laten verschillen. Dit vergt extra aannames en maakt de berekeningen complexer. De conclusies van het rapport worden hier niet wezenlijk anders van. Overigens gaat ECN er vanuit dat elektrische en waterstofvoertuigen volwaardige voertuigen zijn met voldoende actieradius zodat de markt zich niet beperkt tot stadsauto's. De hogere investeringskosten van het voertuig maken het gunstiger om juist veel kilometers te maken. Op dit punt verschillen TNO en ECN van inzicht.

ECN en TNO hebben verschillende verwachtingen van de gemiddelde CO₂-emissie van de brandstoffen, voor zover die afhankelijk zijn van de gekozen productieroute. In het rapport wordt ingegaan op de uitgangspunten. Een groot deel van de uitgangspunten van ECN moet gezien worden binnen de context van een ambitieus klimaatbeleid op alle fronten.

⁵² Reactie op TNO-review van de ECN-studie 'Duurzame Innovatie in het Wegverkeer', C.B. Hanschke en P. Kroon, ECN-BS--08-043, 23 december 2008.

⁵³ TNO-review van de ECN-studie 'Duurzame Innovatie voor het Wegverkeer', G.L.M. Passier en R. Verbeek, MON-MEM-033-2008-04148, 23 december 2008.