

Naar duurzaam wegverkeer in 2050

Een verkenning van mogelijke opties

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid

Saeda Moorman
Maarten Kansen

november 2011

Het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) maakt analyses van mobiliteit die doorwerken in het beleid. Als zelfstandig instituut binnen het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) maakt het KiM strategische verkenningen en beleidsanalyses.

De inhoud van de publicaties van het KiM behoeft niet het standpunt van de minister en/of de staatssecretaris van IenM weer te geven.

Inhoud

Samenvatting 5

1	Achtergrond en onderzoeksanpak 11
1.1	Aanleiding 11
1.2	Onderzoeksvragen 12
1.3	Werkwijze en reikwijdte van het onderzoek 14
1.4	Referentiesituatie 16
1.5	Leeswijzer 18
2	Oplossingsrichtingen 19
2.1	Karakterisering van oplossingsrichtingen 19
2.2	Combineren van oplossingsrichtingen 22
3	Selectie van opties per oplossingsrichting 25
3.1	Opties oplossingsrichting KILOMETERS 25
3.2	Opties oplossingsrichting VOERTUIG 27
3.3	Opties oplossingsrichting ENERGIE 30
3.4	Opties oplossingsrichting FILTER 32
4	Effect van oplossingsrichting KILOMETERS 35
4.1	Overzicht van effecten 35
4.2	Effect op emissies, verkeersveiligheid en doorstroming per optie 38
4.3	Optelsom 44
5	Effect van oplossingsrichting VOERTUIG 45
5.1	Overzicht van effecten 45
5.2	Effect op emissies, verkeersveiligheid en doorstroming per optie 48
6	Effect van oplossingsrichting ENERGIE 53
6.1	Overzicht van effecten 53
6.2	Effect op emissies, verkeersveiligheid en doorstroming per optie 56
7	Effect van oplossingsrichting FILTER 59
7.1	Overzicht van effecten 59
7.2	Effect op emissies, doorstroming en verkeersveiligheid per optie 60
8	Effect van combinatie van oplossingsrichtingen 61
8.1	Totaaleffect op emissies bij verschillende combinaties 61
8.2	Emissiedoelen bereikt? 64
9	Belemmerende factoren bij de oplossingsrichtingen 67
9.1	Kosten en complexiteit oplossingsrichting KILOMETERS 67
9.2	Kosten en complexiteit oplossingsrichting VOERTUIG 72
9.3	Kosten en complexiteit oplossingsrichting ENERGIE 76
9.4	Kosten en complexiteit van combinatie van oplossingsrichtingen 78

10	Verzilveren 79
10.1	Welke ontwikkelingen zijn nodig? 79
10.2	Welke actoren zijn betrokken? 81
10.3	Wanneer is betrokkenheid nodig? 82
10.4	Hoe zijn technische opties te realiseren? 82

Summary 85

Literatuur 91

Bijlage A	Referentiescenario 99
A.1	Inleiding 99
A.2	Voertuigkilometers (vkm) 99
A.3	Voertuigefficiency (MJ/vkm) 100
A.4	CO ₂ -intensiteit transportbrandstof (CO ₂ /MJ) 101
A.5	CO ₂ -intensiteit elektriciteit (CO ₂ /kWh) 101
A.6	NO _x - en PM ₁₀ -uitstoot van het wegverkeer 102
A.7	Olieafhandelbaarheid van het wegverkeer 102

Colofon 104

Samenvatting

Het is mogelijk om met bekende technieken de uitstoot van CO₂ en luchtvervuilende stoffen door het wegverkeer in 2050 sterk te verminderen en het wegverkeer veel minder afhankelijk te maken van olie. Bij CO₂ is een reductie van 60 à 80 procent ten opzichte van 1990 mogelijk; de uitstoot van luchtvervuilende stoffen (NO_x, PM₁₀) daalt bij het huidige beleid al sterk, maar kan nog verder omlaag. Dat kan vooral met alternatieve voertuigtypen, zoals elektrische en brandstofcelvoertuigen, en met energiedragers die weinig CO₂ en luchtvervuiling veroorzaken, zoals elektriciteit en waterstof. Ook verminderen van de mobiliteitsbehoefte kan een bijdrage leveren. Mogelijkheden zijn bijvoorbeeld een betere logistiek in het vrachtverkeer, een hogere kilometerprijs in het wegverkeer, een verschuiving van wegverkeer naar andere vervoermiddelen (*modal shift*) en meer thuiswerken. Dit bevordert tegelijk de doorstroming van het wegverkeer en de verkeersveiligheid.

De alternatieve voertuigen, emissiearme energie en lagere mobiliteitsbehoefte komen er niet vanzelf. Overheidsbetrokkenheid is een noodzakelijke voorwaarde. In ieder geval moeten de alternatieve voertuigen en energiedragers nog een grote technische ontwikkeling doormaken om goedkoper te worden. Maar ook na sterke kostendaling zullen ze mogelijk duurder zijn dan de huidige vervuilende technieken. Om een grootschalige inzet mogelijk te maken, moeten de emissiearme technieken kunnen concurreren met de (goedkopere) vervuilende technieken. Dit is realiseerbaar met overheidsbeleid dat sturend is op lage uitstoot, bijvoorbeeld emissienormering of -beprijzing. Dit laat marktpartijen vrij in hun techniekeuze, wat verstandig is omdat nu nog niet bekend is welke emissiearme technieken zich het beste zullen ontwikkelen qua kosten en maatschappelijk draagvlak. De lange ontwikkel- en doorlooptijden van de emissiearme technieken vergen een tijdige inzet van beleidsinstrumenten om in 2050 een grote emissiereductie te kunnen halen.

Het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) heeft het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) gevraagd te verkennen welke concrete mogelijkheden er zijn om ervoor te zorgen dat het wegverkeer in 2050 veel minder broeikasgassen (CO₂) en luchtvervuilende stoffen (NO_x en PM₁₀, ofwel fijn stof) uitstoot en minder olieafhankelijk is dan in 1990. Ook is de vraag onder welke condities dat kan en wat de effecten zijn op verkeersveiligheid en doorstroming van het verkeer. Voor CO₂ is als concreet doel gekozen een vermindering met 60 à 80 procent in 2050 ten opzichte van 1990. De directie Klimaat en Luchtkwaliteit van het directoraat-generaal Milieu wil de resultaten van de verkenning gebruiken bij de ontwikkeling van een 'Routekaart Klimaat 2050' voor het halen van de CO₂-reductie in 2050, en eventuele vervolgacties daarop.

Het KiM heeft deze toekomstverkenning uitgevoerd door middel van een *quick scan* van bestaande literatuur, interviews met kennisinstellingen en eigen analyse. Gezien de verre tijdshorizon en de onzekerheid die daarmee gepaard gaat, is gekeken naar de *orde van grootte* van emissiereductie en kosten en naar de *globale*

effecten op doorstroming van het verkeer en verkeersveiligheid. De effecten zijn afgezet tegen de referentiesituatie: een inschatting van de situatie in 2050 bij voortzetting van het huidige vastgestelde beleid en bestaande trends.

Vier oplossingsrichtingen

De emissies van CO₂, NO_x en PM₁₀ hebben grotendeels een gemeenschappelijke oorsprong. Het zijn alle drie verbrandingsemissies, die ontstaan bij het verbranden van olie (of andere brandstoffen). Dit maakt dat er veel mogelijkheden zijn om deze emissies en de olieafhankelijkheid tegelijkertijd te verminderen. We onderscheiden vier mogelijke oplossingsrichtingen.

1. Oplossingsrichting KILOMETERS: minder kilometers rijden. Opties zijn thuiswerken, elektronisch winkelen en vergaderen (gefaciliteerd door inzet van ICT), verschuiving van wegverkeer naar andere vervoermiddelen (*modal shift*), verbeterde logistiek in het vrachtverkeer, compacte steden en een hogere kilometerprijs.
2. Oplossingsrichting VOERTUIG: energiezuiniger rijden door aanpassing van het voertuig en de rijsnelheid. Opties zijn een zuinige motor, lichtgewicht en 'slimme' voertuigen, emissiearme snelheid en elektrische en brandstofcelvoertuigen.
3. Oplossingsrichting ENERGIE: inzetten van alternatieve energiedragers die minder emissies veroorzaken per eenheid energie die het voertuig gebruikt. Het gaat om alternatieven voor benzine en diesel. Opties zijn biobrandstof en emissiearme elektriciteit en waterstof.
4. Oplossingsrichting FILTER: filteren of afvangen van de uitlaatgassen van voertuigen zodat ze niet in de omgeving terechtkomen (*end-of-pipe*). Opties zijn roetfilters, katalysatoren en uitlaatgascirculatie.

De eerste oplossingsrichting is niet-technisch van aard, al kan techniek wel een faciliterende rol spelen. De tweede, derde en vierde zijn vooral technisch van aard.

Alternatieve energiedragers inzetten biedt meeste kansen

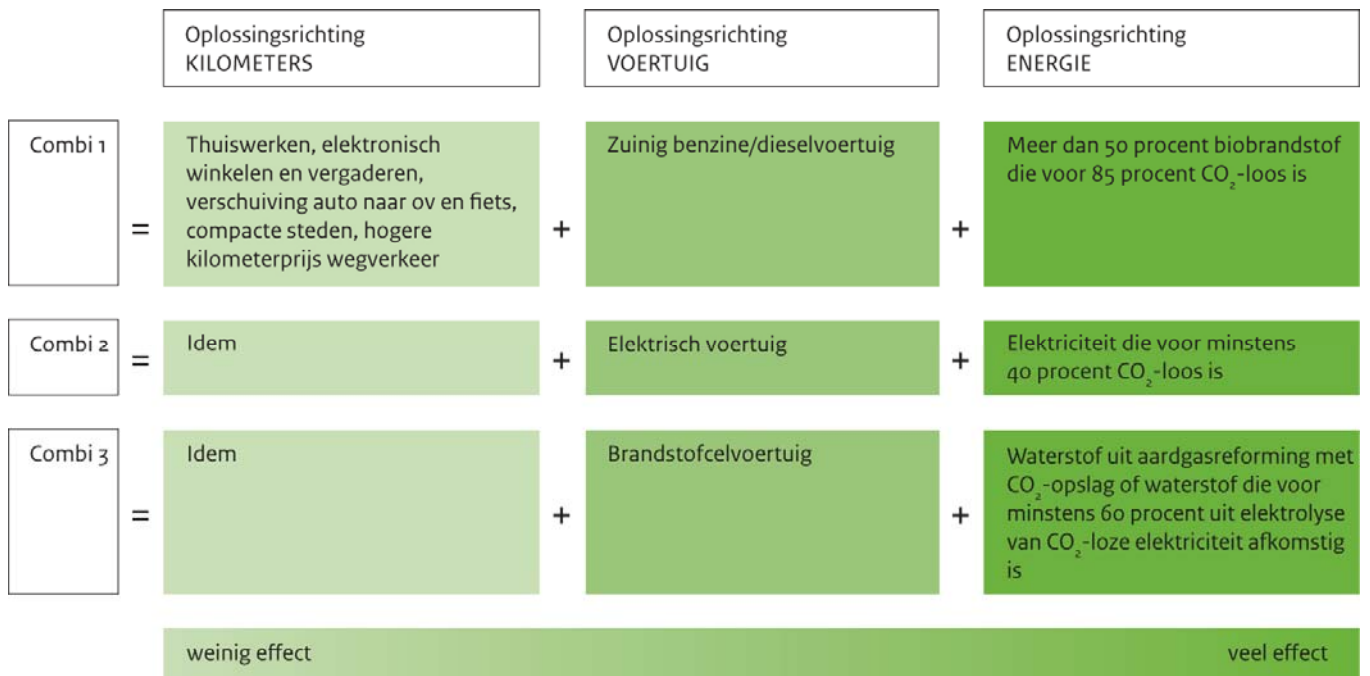
Uit de verkenning komt het volgende naar voren:

- Alternatieve energiedragers inzetten, biedt de meeste mogelijkheden voor het verminderen van emissies en olieafhankelijkheid, gevolgd door energiezuiniger rijden door aanpassing van het voertuig en de rijsnelheid. Minder kilometers rijden, biedt de minste kansen.
- Uitlaatgassen van voertuigen afvangen of filteren levert veel mogelijkheden om de emissies van NO_x en PM₁₀ te verminderen. De opties die we in de literatuur hebben gevonden, worden bij het huidige beleid ook al ingezet, zodat de additionele emissiereductie gering is.
- Aanpassing van de rijsnelheid, maar vooral minder kilometers rijden, kan een positief effect hebben op de doorstroming van het verkeer en de verkeersveiligheid; alternatieve energiedragers inzetten en uitlaatgassen afvangen hebben hierop geen invloed.
- De potentiële mogelijkheden voor emissiereductie en verminderen van olieafhankelijkheid zijn bij personenauto's bij alle oplossingsrichtingen (veel) groter dan bij vrachtauto's. Dit komt doordat bij vrachtauto's elektrische en brandstofcelvoertuigen minder goed inzetbaar zijn. Hierdoor vervalt ook de mogelijkheid om emissiearme elektriciteit en emissiearme waterstof in te zetten, die juist veel kansen bieden.

CO₂-doel van 60 à 80 procent reductie ten opzichte van 1990 in theorie haalbaar

Bij personenauto's is het in potentie mogelijk om het CO₂-doel van 60 à 80 procent reductie in 2050 te halen met elk van de volgende combinaties van opties uit de oplossingsrichtingen KILOMETERS, VOERTUIG en ENERGIE:

Figuur S.1
Combinaties van opties bij personenauto's waarmee het doel van -60 à 80 procent CO₂ in 2050 te halen is

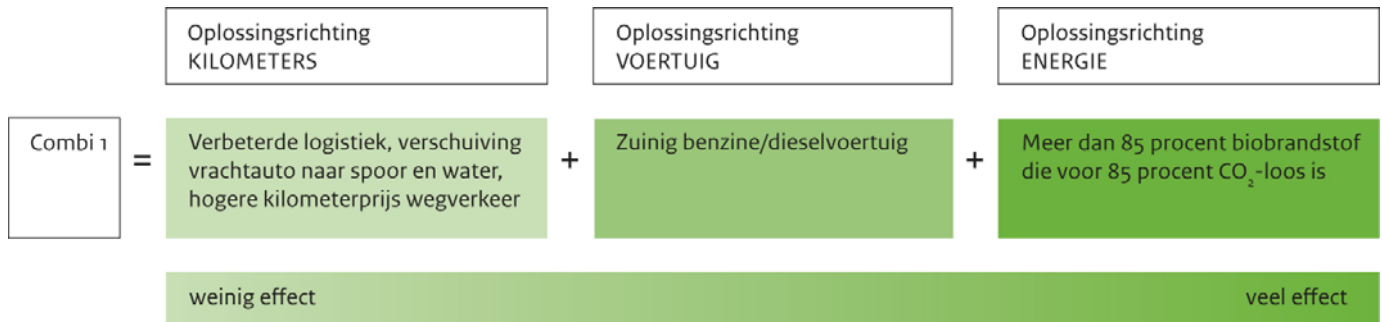


Overigens is het CO₂-doel ook haalbaar zonder gebruik te maken van de oplossingsrichting KILOMETERS, mits de percentages in de laatste kolom een paar procentpunten stijgen.

Bij vrachtauto's is het CO₂-doel van 60 à 80 procent reductie in 2050 in theorie haalbaar met de volgende combinatie:

Figuur S.2

Combinatie van opties bij vrachtauto's waarmee het doel van -60 à 80 procent CO₂ in 2050 te halen is



Zonder gebruik te maken van de oplossingsrichting KILOMETERS is het CO₂-doel is bij vrachtwagens haalbaar bij 100 procent inzet van biobrandstof.

Kosten en maatschappelijk draagvlak zijn potentiële belemmeringen

Belemmeringen voor het verzilveren van het potentieel van de vier oplossingsrichtingen zijn met name:

- Hogere kosten. Emissiearm wegverkeer in 2050 is duurder dan het wegverkeer in de referentiesituatie. De alternatieve voertuigen en energiedragers zijn - zeker op dit moment, maar mogelijk blijft dit zo - duurder dan conventionele auto's op benzine en diesel, die al een grote ontwikkeling achter de rug hebben. Ook de opties die zorgen voor minder kilometers rijden, zoals een verschuiving van wegverkeer naar andere vervoermiddelen en compacte steden, kunnen kostbaar zijn.
- Onzekerheid over technische ontwikkeling: Om de huidige hoge kosten van emissiearme voertuigen en energiedragers omlaag te krijgen is nog een aanzienlijke technische ontwikkeling nodig. Het is onzeker of die er komt. Er kan een kip-ei-situatie ontstaan, wanneer kosten pas omlaag kunnen, als de techniek een grote afzetmarkt heeft (dus door schaalvoordelen).
- Gebrek aan maatschappelijk draagvlak. Op zichzelf leveren de alternatieve voertuigen en energiedragers de gebruiker geen toegevoegde waarde ten opzichte van het traditionele benzine/dieselveertuig, en soms zelfs een achteruitgang in comfort. Ook de opties die zorgen voor minder kilometers rijden, zijn over het algemeen niet zo populair.
- Specifiek bij de toepassing van biobrandstof is de beperkte beschikbaarheid van biomassa mogelijk een belemmering. De biomassa voor biobrandstof concurreert met andere (voedsel)gewassen om land, voedingsstoffen en water en bij de toepassing van biomassa als energiebron is er concurrentie tussen sectoren.

Wat is er nodig om theoretische mogelijkheden te realiseren?

Duurzaam wegverkeer komt niet vanzelf tot stand. Voor een grote emissiereductie bij het wegverkeer is een (sterke) overheidsbetrokkenheid een noodzakelijke voorwaarde. Er moet een groot aantal actoren in stelling worden gebracht. Voor de

realisatie van emissiearme technieken zijn dat vooral de auto-industrie en de energiesector. Olieschaarste wordt naar verwachting niet de grote *driver* voor emissiereductie. Er zijn nog veel onconventionele oliebronnen beschikbaar, zoals olie uit aardgas of steenkool, die bij stijgende olieprijs rendabel te winnen zijn. Bij schaarste aan conventionele olie is de overstap naar duurzame, emissiearme energiedragers dus niet vanzelfsprekend.

Op dit moment is nog niet duidelijk welke emissiearme techniek zal gaan 'winnen', dat wil zeggen qua kosten en maatschappelijk draagvlak het beste zal gaan scoren. Mogelijk komt er zelfs geen absolute winnaar, maar verovert elke techniek zijn eigen specifieke toepassingsgebied. Het is voor de overheid daarom verstandig om alle technische opties open te houden. Voorwaarde voor de emissiearme technieken om grootschalig te worden ingezet is dat ze kunnen concurreren met (goedkopere) vervuilende technieken, zoals de conventionele benzine- en dieselloerluigen. Dit is realiseerbaar door een overheidsbeleid te voeren dat stuurt op lage emissies, bijvoorbeeld via emissienormering of -beprijzing. Hierdoor blijven tevens alle opties open: de overheid maakt geen techniekkeuze, marktpartijen kunnen zelf kiezen welke techniek voor hen het voordeligst is. Vanwege de onzekerheid of de emissiearme technieken zich voldoende ontwikkelen, is het verstandig om ook in te zetten op vermindering van de mobiliteitsbehoefte (minder rijden).

Beleidsmaatregelen dienen tijdig te worden ingezet, omdat het lang duurt voordat een nieuwe techniek of optie voor kilometerreductie verder ontwikkeld en grootschalig geïmplementeerd kan zijn. Het gaat om een fundamentele wijziging ten opzichte van de huidige situatie, die niet snel te realiseren is. Bij de ontwikkeling van nieuwe voertuigtypen en emissiearme energiedragers is de schaalgrootte vooral Europees. Daarom is overheidsbeleid op Europees niveau nodig. Bij het verminderen van autokilometers ligt overheidsbeleid op nationaal en regionaal niveau voor de hand.

1 Achtergrond en onderzoeksaanpak

- *Deze verkenning levert input voor de nationale 'Routekaart Klimaat 2050' en voor beleidsontwikkeling op het gebied van duurzame mobiliteit.*
- *De verkenning is een quick scan van literatuur, gecombineerd met interviews met kennisinstellingen en eigen analyse van het KiM.*
- *Een gewenste grote emissiereductie in het wegverkeer is uitgangspunt; er is niet onderzocht of deze emissiereductie kostenoptimaal is ten opzichte van emissiereductie in andere sectoren.*
- *Onderzocht zijn mogelijke opties voor emissiereductie en vermindering van de olieafhankelijkheid en de condities waaronder ze gerealiseerd kunnen worden.*

1.1 Aanleiding

Het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM)¹ heeft het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM) gevraagd een toekomstverkenning te doen naar de mogelijkheden voor een wegverkeerssysteem dat in 2050 veel minder kooldioxide (CO₂), stikstofoxiden (NO_x) en fijn stof (PM₁₀) uitstoot en dat bovendien minder olieafhankelijk is. CO₂ is een stof die bijdraagt aan het broeikaseffect, NO_x en PM₁₀ zijn luchtvervuilende stoffen. Ook is de vraag onder welke condities zo'n nieuw wegverkeerssysteem tot stand gebracht kan worden en wat de effecten zijn op verkeersveiligheid en bereikbaarheid.

De verkenning van het KiM levert *input* voor de nationale 'Routekaart Klimaat 2050' (CO₂-beleid voor de lange termijn), die in november 2011 zal uitkomen, en eventuele vervolgacties daarop. In de 'Routekaart Klimaat 2050' wil het kabinet inzicht geven in de 'specifieke uitdagingen en kansen voor Nederland die samenhangen met een transitie naar een klimaatneutrale economie' (IenM 2011). Nederland geeft hiermee invulling aan de oproep van de Europese Commissie (maart 2011) aan alle EU-lidstaten om nationale routekaarten te maken. In 2009 heeft Nederland zich in EU-verband gecommitteerd aan een EU-brede CO₂-emissiereductie van 80 à 95 procent in 2050 ten opzichte van 1990. In maart 2011 heeft de Europese Commissie in de mededeling 'Routekaart naar een concurrerende koolstofarme economie in 2050' een voorstel gedaan voor een verdeling van dit 80 à 95 procent-doel naar de verschillende sectoren (EC, 2011). In het voorstel van de Commissie krijgt de transportsector een CO₂-reductiedoel van 60 procent toebedeeld (in 2050 ten opzichte van 1990). Voor het wegverkeer valt een CO₂-emissiereductiedoel van circa 70 procent af te leiden.² In het Witboek Transport presenteert de Commissie verder een voorstel voor de te voeren beleidsstrategie om het 60 procent-doel voor de transportsector als geheel te realiseren (EC, 2011b).

¹ Aanvankelijk kwam de vraag van de directie Wegen en Verkeersveiligheid van het directoraat-generaal Mobiliteit (DGMo-WV), later is deze vraag overgenomen door de directie Klimaat en Luchtkwaliteit van het directoraat-generaal Milieu (DGM).

² Dit hebben we afgeleid uit (EC, 2011a), waarin de CO₂-reductie voor de transportsector *exclusief lucht- en scheepvaart* in de verschillende scenario's steeds rond 70 procent bedraagt. Omdat hierin het wegtransport verreweg het grootste aandeel heeft, nemen we aan dat de 70 procent reductie ook op het wegverkeer sec van toepassing is.

Behalve voor CO₂-reductie, heeft IenM ook bredere ambities op het gebied van duurzame mobiliteit. Met name ambities op het gebied van luchtkwaliteit, energiezekerheid, verkeersveiligheid en bereikbaarheid spelen een belangrijke rol, evenals de ambitie om tegemoet te komen aan de toekomstige mobiliteitsvraag zonder een al te groot beroep te doen op grootschalige aanleg van nieuwe infrastructuur.

1.2 Onderzoeksvragen

De twee centrale onderzoeksvragen in deze verkenning zijn:

1. **Wat zijn de mogelijke opties om in 2050 in het wegverkeer te komen tot een CO₂-reductie van 60 à 80 procent (ten opzichte van 1990), een grote afname van de NO_x- en PM₁₀-uitstoot en vergroting van de energiezekerheid? En wat zijn de effecten van die opties op verkeersveiligheid en bereikbaarheid?**
2. **Onder welke condities kunnen deze mogelijke opties worden gerealiseerd?**

De bandbreedte van 60 à 80 procent CO₂-reductie is gekozen in lijn met enerzijds het CO₂-reductiedoel van 80 (à 95 procent) voor de EU als geheel (economiebreed) dat in 2009 binnen de EU is afgesproken, en anderzijds het recente voorstel van de Europese Commissie voor 60 procent CO₂-emissiereductie in de transportsector (zie vorige paragraaf).

Onder 'mogelijke opties' verstaan we enerzijds technische opties – zoals zuinige voertuigen en alternatieve brandstoffen – en anderzijds opties die de mobiliteitsbehoefte verminderen. Het laatste type opties is niet technisch van aard – al kan techniek soms wel een faciliterende rol spelen³ –, maar is vooral gedragsmatig. Het gaat daar om keuzes die burgers en bedrijven maken in het aantal en de lengte van verplaatsingen en het type vervoermiddel dat ze daarbij kiezen.

Voor het begrip 'mogelijk' hanteren we bij beide typen opties een verschillende invalshoek.

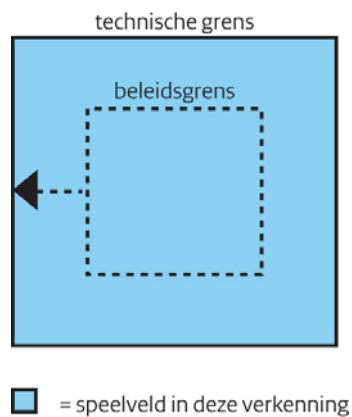
Bij de technische opties verkennen we de grenzen van wat technisch mogelijk is: welke emissiereductie is technisch realiseerbaar, *wat vermag de techniek?* We kijken niet alleen naar de huidige stand van de techniek, maar juist ook – gezien het zichtjaar 2050 van de verkenning – naar het ontwikkelpotentieel. Dit speelveld wordt weergegeven in figuur 1.1.

Of deze technische mogelijkheden in de praktijk worden gerealiseerd, is mede afhankelijk van het gevoerde beleid. Normaal gesproken zal niet alles wat technisch mogelijk is, worden gerealiseerd, bijvoorbeeld omdat er geen maatschappelijke acceptatie voor is. Hier spelen politieke en maatschappelijke keuzes. Dit is in de figuur aangegeven met een beleidsgrens: *wat vermag het beleid?* Deze grens ligt logischerwijs *binnen* de technische grens. De pijl in de figuur geeft symbolisch aan hoever het beleid zou moeten opschuiven om alle opties uit het technische speelveld te realiseren.

³ Bijvoorbeeld ICT-toepassingen die het mogelijk maken om thuis te werken, zodat de behoefte aan woonwerkverkeer vermindert,

Figuur 1.1

Het speelveld bij de technische opties

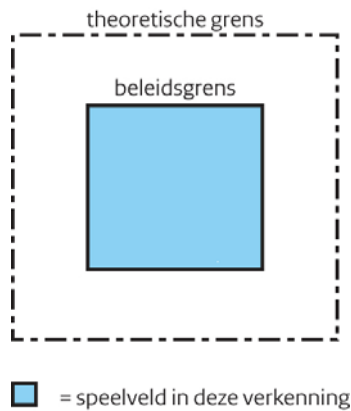


Bij de opties die inspelen op de mobiliteitsbehoefte, kijken we bij wat 'mogelijk' is niet naar wat theoretisch maximaal kan, maar wat beleidsmatig kan: *wat vermag het beleid?* Bijvoorbeeld bij *modal shift*, een wijziging in de modaliteitskeuze, is in theorie een totale overstap van de auto naar de fiets en openbaar vervoer en van de vrachtauto naar binnenvaart en spoor denkbaar. Dit zou bereikt kunnen worden door het gebruik van de (vracht)auto te verbieden of extreem duur te maken in vergelijking tot alternatieven. Daarmee zijn alle emissies en olieafhankelijkheid van het wegverkeer in één klap de wereld uit. Ook verplicht thuiswerken voor iedereen met een kantoorbaan zou een extreme verandering in de mobiliteitsbehoefte kunnen betekenen. In de praktijk zal dit maximum, ondanks dat het in theorie *mogelijk* is, nooit bereikt worden, omdat dit extreme beleid maatschappelijk onacceptabel en onwenselijk is. Omdat we het niet zinvol achten om in deze verkenning de uiterste, theoretische grens op te zoeken, verkennen we bij dit tweede type opties wat er mogelijk is binnen een zekere (gemiddelde) beleidsgrens.⁴ Bijvoorbeeld bij *modal shift* gaat het dan om een prikkel die een beperkte overstap naar openbaar vervoer en fiets bewerkstelligt. Dit is weergegeven in figuur 1.2.

Voor 'energiezekerheid' hebben we in deze verkenning de benadering 'olieonafhankelijkheid' gekozen. Het wegverkeer is op dit moment voor ongeveer 95 procent afhankelijk van olie. Deze olieafhankelijkheid is veel groter dan in andere sectoren, bijvoorbeeld de elektriciteitssector, en vormt het grootste risico voor de energiezekerheid van het wegverkeerssysteem. Het maakt het wegverkeer zeer kwetsbaar voor ontwikkelingen op de mondiale oliemarkt (olieprijs, olievoorraden). Daarbij komt dat de meeste olie van buiten Europa wordt geïmporteerd, vaak uit politiek instabiele regio's.

⁴ Deze benadering zou zich in principe goed lenen voor een aanpak met meerdere scenario's: waar komen de randen van het speelveld te liggen bij een zeer bescheiden of juist een zeer intensief mobiliteitsreductiebeleid? Gezien het *quick scan* karakter van deze verkenning zijn we uitgegaan van een gemiddeld beleidsscenario, dat min of meer tussen beide uitersten inligt.

Figuur 1.2
Het speelveld bij de opties die inspelen op de mobiliteitsbehoefte



Voor bereikbaarheid hebben we de benadering 'doorstroming op de weg' gekozen: verbetert of verslechtert de doorstroming op de weg bij toepassing van de opties op het gebied van emissiereductie en olieonafhankelijkheid? Voor de verkeersveiligheid kijken we naar de kans dat het aantal doden en gewonden in het verkeer toeneemt ten opzichte van de referentiesituatie.

1.3 Werkwijze en reikwijdte van het onderzoek

Literatuuronderzoek en interviews, gecombineerd met eigen analyse KiM

Deze verkenning is uitgevoerd op basis van een *quick-scan* van bestaande literatuur, aangevuld met interviews met onderzoekers bij een aantal Nederlandse kennisinstellingen (Planbureau voor de Leefomgeving, Energieonderzoek Centrum Nederland, CE Delft, TNO, Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart). Daarnaast heeft het KiM een eigen analyse en synthese op de bevindingen uitgevoerd, met name om literatuurbronnen met elkaar vergelijkbaar te maken en het gecombineerde effect van opties te kunnen inschatten.

Alleen de categorieën personen- en vrachtauto's

We focussen in deze verkenning op personenauto's en vrachtwagens, die samen goed zijn voor ongeveer 80 procent van de emissies van het wegverkeer. Tegelijk zijn deze categorieën onderling sterk verschillend, met elk eigen specifieke mogelijkheden voor emissiereductie. Het CO₂-reductiedoel van 60 à 80 procent hebben we op beide categorieën afzonderlijk toegepast. Er is dus gezocht naar opties waarmee enerzijds het personenautopark en anderzijds het vrachtwagenpark zijn emissies met 60 à 80 procent reduceert. Bussen, brommers, motoren en bestelauto's nemen we niet mee. Bestelauto's dragen weliswaar ook sterk bij aan de voertuigkilometers en CO₂-uitstoot van het wegverkeer (met in beide een aandeel van ongeveer 14 procent), maar de opties voor emissiereductie bij bestelauto's liggen veelal tussen die van personen- en vrachtauto's in. Deze categorie apart beschouwen zal daarom niet veel nieuwe inzichten verschaffen.

Emissies zijn 'well-to-wheel', kosten zijn 'out-of-pocket'

De opties zijn onderzocht op hun effect op emissies (CO₂, NO_x en PM₁₀), olieafhankelijkheid, doorstroming en verkeersveiligheid. Daarnaast hebben we gekeken naar de kosten en de complexiteit van de opties.

- Emissies: Bij de emissies is gekeken naar de *well-to-wheel* emissies. Dat wil zeggen de emissies vanaf de winning van de energie (*well*) tot en met de

uitstoot op voertuigniveau (*wheel*). Dus bij een elektrische auto zijn de emissies die ontstaan bij de productie van elektriciteit in de elektriciteitscentrales meegeteld, bij diesel en benzine de emissies die ontstaan in het raffinageproces. Bij biobrandstof is de CO₂-uitstoot in de hele keten vanaf de groei van biomassa meegeteld. Dit is inclusief eventuele uitstoot in het buitenland. Verder zijn alleen emissies tijdens de gebruiksfase van personenauto's en vrachtwagens meegenomen, en dus niet tijdens de productie- en sloopfase.⁵

- Kosten: Bij de kosten hebben we ons beperkt tot de directe (meer)kosten van de opties voor de eindgebruiker en de exploitant, dat wil zeggen de kosten die in marktprijzen zijn uit te drukken. Dit worden in de literatuur ook wel *out-of-pocket*-kosten genoemd.⁶ Reistijdverlies en nutsverlies⁷, die niet in marktprijzen worden uitgedrukt, laten we in deze verkenning als kosten buiten beschouwing; deze komen wel aan bod bij de beschouwing van de maatschappelijke acceptatie van opties (zie onder Complexiteit).
- Complexiteit: Hieronder vallen aspecten zoals het maatschappelijk draagvlak (bij burgers en bedrijven), risico's en onzekerheden bij de implementatie - bijvoorbeeld er is nog veel technische ontwikkeling nodig, waarvan het onzeker is of die voorspoedig verloopt - en de vraag of invoering van de optie ingewikkeld is, bijvoorbeeld omdat er veel partijen bij betrokken zijn.

Alleen ordegroottes van effecten, kwalitatief en waar mogelijk kwantitatief

Gezien de verre tijdshorizon van de verkenning en de onzekerheid die daarmee gepaard gaat, geven we de effecten op emissies, olieafhankelijkheid, doorstroming en verkeersveiligheid voornamelijk kwalitatief weer. Kwalitatief wil zeggen, heeft een optie een positief ('+') , negatief ('-') of neutraal ('0') effect ten opzichte van de referentiesituatie. (Voor een toelichting op de referentiesituatie zie hieronder.) Een '+' of '-' geven we pas bij een substantieel verschil (enkele procenten) met de referentiesituatie. Waar mogelijk presenteren we de effecten op de emissies ook kwantitatief, om daarmee inzicht te geven in de onderlinge verhouding tussen opties. Het gaat dan nadrukkelijk om ordegroottes. Deze kwantitatieve effecten hebben een zekere, moeilijk in te schatten marge. Ook de kosten van opties bekijken we alleen globaal, in ordegroottes.

Geen kostenoptimalisatie

Uitgangspunt voor de verkenning is een gewenste grote emissiereductie bij het wegvervoer. Voor de verschillende categorieën binnen het wegverkeer, zoals personen- en vrachtauto's, is hetzelfde reductiedoel gehanteerd. Er is niet onderzocht of deze mate van emissiereductie kostenoptimaal is ten opzichte van emissiereductie in andere sectoren. Ook is op de geselecteerde opties voor

⁵ Het energiegebruik (en daarmee de emissies) tijdens de productie- en sloopfase van voertuigen bedraagt ongeveer 20 procent van die tijdens de gebruiksfase (de verhouding is productie:gebruik:sloop = 10:85:5) (Pridmore, 2010). Voor elektrische voertuigen zijn de productie- en sloopfase iets intensiever, maar ook daar blijft de gebruiksfase dominant (Essen, 2011).

⁶ De *out-of-pocket*-kosten vallen binnen de 'financiële benadering' (Van den Brink, 2007), in tegenstelling tot de 'welvaartsbenadering' die kijkt naar de kosten voor de hele maatschappij, inclusief de kosten die niet in marktprijzen zijn uit te drukken (reistijdverlies, nutsverlies etc.) en inclusief de kosten van externe effecten zoals congestie, geluidhinder, emissies en ongevalrisico's.

⁷ Nutsverlies kan bijvoorbeeld optreden bij de overstap naar een kleinere auto of naar een auto met een beperkte actieradius.

emissiereductie binnen het wegverkeer geen onderlinge kostenvergelijking toegepast.

Selectie van opties: onderscheidend, effectief, geen 'Willie-Wortelopties'

Hoe creatief sommige ideeën ook zijn, we kijken in deze verkenning niet naar 'out-of-the-box' en 'futuristische' concepten zoals vliegende auto's of ondergronds transport met capsulewagentjes (zie figuur 1.3). Uit de literatuur maken we op dat dergelijke concepten te ver afstaan van de huidige *state-of-the art*, trends en ontwikkelingen om hiervan in 2050 een substantiële bijdrage aan emissiereductie te kunnen verwachten. Sterker nog, veel van de radicaal andere vervoersconcepten lijken meer energie te gebruiken dan conventionele technieken (Skinner, 2010).

Ook zonder deze 'futuristische' opties blijven er nog genoeg opties over, die in meer of mindere mate kunnen bijdragen aan emissiereductie en het verminderen van de olieafhankelijkheid. Veel opties zijn er bovendien ook nog in veel verschillende varianten. Bijvoorbeeld biobrandstof, als CO₂-arm alternatief voor benzine en diesel, kan uit heel veel verschillende biomassaströmen en met heel verschillende productieprocessen worden geproduceerd, wat tientallen varianten oplevert (zie bijvoorbeeld EUCAR/JRC/CONCAWE, 2008). Het maken van een selectie uit alle mogelijke opties is daarom onvermijdelijk. Bij onze selectie hebben we de volgende vuistregels toegepast:

- De optie komt vaak voor in de maatschappelijke discussie over duurzaamheid (bijvoorbeeld elektrische auto's, waterstof in brandstofcelauto's, intelligente transportsystemen) en wordt in meerdere rapporten beschreven.
- De optie onderscheidt zich in voldoende mate van andere opties, zodat er ondanks de beperkte selectie toch inzicht ontstaat over de volle breedte van opties.
- De optie heeft potentie om de emissies substantieel, met minstens enkele procenten, te verminderen.

Figuur 1.3

'Willie-Wortelopties': de vliegende auto Terrafugia (<http://www.terrafugia.com>) en de Cargocap (<http://www.cargocap.com>)



1.4

Referentiesituatie

Om te weten of het doel van sterke emissiereductie in 2050 ten opzichte van nu wordt bereikt, moet duidelijk zijn hoe de emissies zich anders zouden hebben ontwikkeld. Met andere woorden, de opties moeten worden afgezet tegen een referentiesituatie. Als referentiesituatie nemen we de situatie met een voortzetting van de huidige trends en het vastgestelde beleid. Wat dit in de praktijk betekent is uiteraard uitermate onzeker. Neemt het wegverkeer toe en zo ja, met hoeveel, wat is de toekomstige samenstelling van het wagenpark, hoe zuinig zijn toekomstige voertuigen, wat voor brandstof gebruiken ze et cetera.

In de periode 1990-2010 heeft de CO₂-emissie van het wegverkeer in Nederland ongeveer gelijke tred gehouden met de groei van het aantal voertuigkilometers: de voertuigkilometers zijn met 35 procent gegroeid en de CO₂-emissies van het wegverkeer met ruim 30 procent. De NO_x- en PM₁₀-emissies van het wegverkeer zijn tussen 1990 en 2010, ondanks de volumegroei van 35 procent, juist met ruim 50 procent gedaald (CBS Statline).

We gaan ervan uit dat in de referentiesituatie, dus bij voortzetting van het huidige, vastgestelde beleid, de CO₂-uitstoot van het wegverkeer de komende decennia licht blijft stijgen, en anderzijds de NO_x- en PM₁₀-emissies (sterk) blijven dalen.⁸ De wereldwijde vraag naar olie neemt sterk toe, met circa 20 procent tussen 2009 en 2035. Deze groei komt op het conto van niet-OESO-landen; in de OESO-landen daalt de olievraag juist. Maar ook de winning van olie neemt de komende decennia toe. De prijs van ruwe olie zal naar verwachting tussen 2009 en 2035 ruwweg verdubbelen⁹ (IEA, 2010).

Stijgende olieprijs zijn geen automatische *trigger* voor een overstap naar duurzamere energiedragers die minder (CO₂-)emissies veroorzaken: niet alleen duurzame energiebronnen, zoals zon- en windenergie, worden bij stijgende olieprijs relatief goedkoper, dit geldt ook voor onconventionele oliebronnen, die over het algemeen juist meer CO₂-emissies veroorzaken dan conventionele olie. De wereldwijde voorraden onconventionele olie zijn gigantisch: enkele malen groter dan die van conventionele olie. Verwacht wordt dat in 2035 onconventionele olie - vooral Canadese zandolie - ongeveer 10 procent van de wereldwijde olieproductie vormt. Een ander alternatief voor olie, NGL (*natural gas liquids*), levert naar verwachting in 2035 15 procent van de olieproductie (IEA, 2010). Ook uit steenkool en aardgas valt onconventionele olie te produceren (*via coal-to-liquid en gas-to-liquid processen*). Steenkool en aardgas zijn wereldwijd ruim voorhanden.

Bij personen- en vrachtauto's zien we in het referentiescenario een verschillende ontwikkeling:

- Met vrachtauto's worden in 2050 2/3 meer voertuigkilometers gereden dan nu, bij personenauto's 1/3 meer. Het aantal vrachtautokilometers groeit dus twee keer zo hard als het aantal personenautokilometers.
- de CO₂-emissie van alle personenauto's samen is in 2050 licht gedaald ten opzichte van nu, terwijl die van het vrachtautopark tussen nu en 2050 met ca. 30 procent groeit.

Hieruit valt af te leiden dat de CO₂-emissie per kilometer bij beide categorieën afneemt.

De olieafhankelijkheid neemt in de referentiesituatie licht af, van 96 procent in 2010 naar 89 procent in 2050 (EC, 2011c). De referentiesituatie is grafisch weergegeven in figuur 1.4. Voor een uitgebreidere toelichting op de wijze waarop we de referentiesituatie hebben bepaald, zie bijlage A.

Deze referentiesituatie betekent dat voor het halen van het CO₂-doel van 60 à 80 procent minder uitstoot in 2050 (ten opzichte van 1990) en een veel kleinere

⁸ Voor de verwachting omtrent CO₂ baseren we ons op Hoer (2010) en Skinner (2010), voor die omtrent NO_x en PM₁₀ en olieafhankelijkheid op de Europese Commissie (EC, 2011c). Zie voor een toelichting bijlage A.

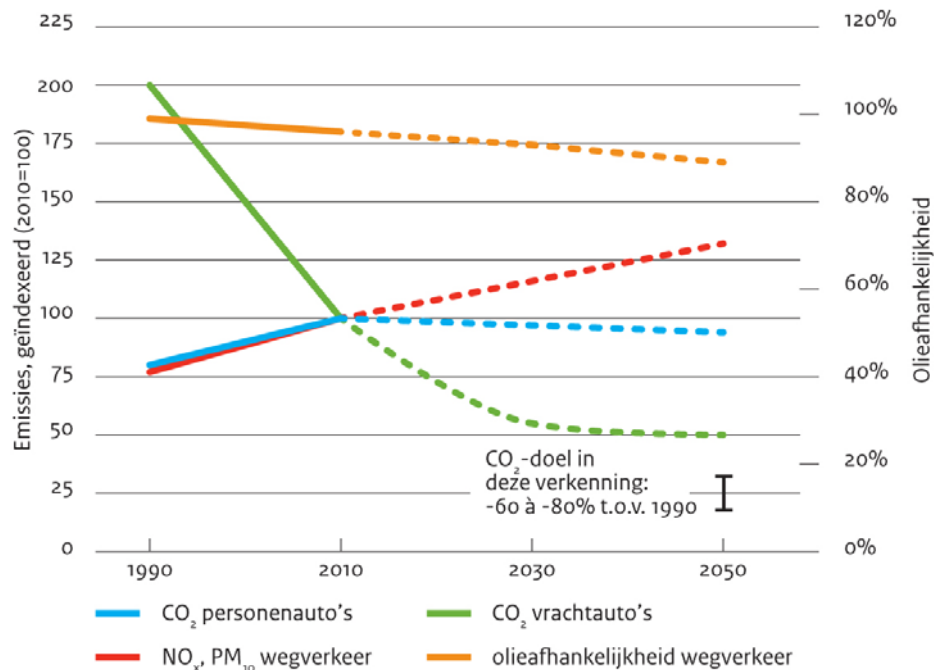
⁹ Van \$60 naar \$113 per vat. Dit geldt bij het *New Policies Scenario*, het scenario dat landen hun huidige beloften voor broeikasgasemissiereductie en het uitfasen van subsidies voor fossiele brandstoffen nakomen.

olieafhankelijkheid een groot gat overbrugd moet worden. Bij NO_x en PM₁₀ is het gat daarentegen veel kleiner, aangezien de emissies in de referentiesituatie tussen 1990 en 2050 al met minstens 75 procent zullen zijn gedaald.

Of het transportvolume tussen nu en 2050 wel of niet groeit, maakt overigens weinig uit voor de omvang van het CO₂-gat. Ook als het transportvolume in plaats van te groeien - zoals verondersteld in het referentiescenario - tussen nu en 2050 gelijk blijft, zijn de CO₂-emissies in 2050 meer dan een factor vijf te hoog om het doel te kunnen halen.

Figuur 1.4

De geïndexeerde ontwikkeling van de uitstoot van CO₂, NO_x, PM₁₀ van 1990 tot 2050 in het referentiescenario, het CO₂-doel (-60 à -80 procent in 2050 ten opzichte van 1990 is gelijk aan -70 à -85 procent ten opzichte van 2010) en de olieafhankelijkheid van het wegverkeer



1.5

Leeswijzer

De hoofdstukken 2 tot en met 8 gaan in op de eerste onderzoeksvraag. Hoofdstuk 2 geeft het theoretisch kader van de oplossingsrichtingen. Hoofdstuk 3 beschrijft de opties die we bij elk van de oplossingsrichtingen hebben geselecteerd. In de hoofdstukken 4 tot en met 7 wordt per oplossingsrichting ingezoomd op de effecten van de diverse opties op emissies, olieafhankelijkheid, doorstroming en verkeersveiligheid. Hoofdstuk 8 is een synthesehoofdstuk, waarin we de verschillende oplossingsrichtingen met elkaar combineren en kijken in hoeverre de milieudoelen worden gehaald.

Hoofdstuk 9 en 10 gaan in op de tweede onderzoeksvraag. Hoofdstuk 9 behandelt de factoren die de realisatie van de opties in 2050 kunnen bemoeilijken. Hier komen kosten en de complexiteit (maatschappelijk draagvlak, risico's en onzekerheden etcetera) van de opties aan de orde. Hoofdstuk 10 gaat in meer beschouwende zin over de condities waaraan voldaan moet worden om de oplossingsrichtingen te kunnen realiseren ('verzilveren').

2 Oplossingsrichtingen

- *We onderscheiden vier oplossingsrichtingen voor het verminderen van emissies en olieafhankelijkheid. Elk grijpt aan op een ander onderdeel van het wegvervoerssysteem. Drie van de vier oplossingsrichtingen zijn vooral technisch, één is overwegend niet-technisch.*
- *Oplossingsrichting KILOMETERS (niet-technisch) gaat over minder rijden en over een verschuiving van wegverkeer naar andere vervoermiddelen.*
- *Oplossingsrichting VOERTUIG (technisch) gaat over energiezuiniger rijden door aanpassing van het voertuig en de rijnsnelheid.*
- *Oplossingsrichting ENERGIE (technisch) gaat over het inzetten van alternatieve energiedragers die minder emissies veroorzaken per eenheid energie die het voertuig gebruikt.*
- *Oplossingsrichting FILTER (technisch) gaat over het filteren/afvangen van de uitlaatgassen van voertuigen zodat ze niet in de omgeving terecht komen (end-of-pipe).*

Voor het verminderen van transportgerelateerde emissies en olieafhankelijkheid zijn in theorie vier oplossingsrichtingen voorhanden, die elk aangrijpen op een ander onderdeel van het wegvervoerssysteem. In dit hoofdstuk karakteriseren we de vier oplossingsrichtingen en gaan we in op de manier waarop ze theoretisch met elkaar te combineren zijn.

2.1 Karakterisering van oplossingsrichtingen

Bij elk van de vier oplossingsrichtingen is de manier waarop wordt gezorgd voor emissiereductie en vermindering van olieafhankelijkheid verschillend. In tabel 2.1 staat een overzicht.

Kilometers





Oplossingsrichting KILOMETERS gaat over minder rijden, het verminderen van de mobiliteitsbehoefte. Deze oplossingsrichting is niet technisch van aard, al kan techniek wel een faciliterende rol spelen. Het principe is simpel: door minder te rijden wordt brandstof (lees: olie) bespaard. Dit zorgt voor minder olieafhankelijkheid en voorkomt emissies, die anders vrij zouden komen bij het verbrandingsproces. NO_x, PM₁₀ en CO₂ zijn alle drie verbrandingsgerelateerde¹⁰ emissies (zie tekstbox 2.1). De maat voor deze oplossingsrichting is de gereden afstand met wegvoertuigen (voertuigkilometers, vkm). Vanuit het oogpunt van emissies en olieafhankelijkheid van het wegverkeer geldt: hoe minder voertuigkilometers er gereden worden, hoe beter.

Deze oplossingsrichting grijpt aan op het aantal en de lengte van verplaatsingen en de keuze om wel of niet een personenauto of vrachtauto te gebruiken of juist een ander vervoermiddel. Bij deze oplossingsrichting zijn onderling zeer verschillende opties denkbaar, variërend van thuiswerken, elektronisch winkelen, elektronisch

¹⁰ Het ontstaan van PM₁₀ uit slijtage van banden, remmen en wegdek laten we in deze verkenning buiten beschouwing.

vergaderen, betere logistiek in het vrachtvervoer en compacte steden tot en met een hogere kilometerprijs.

Tabel 2.1
Overzicht van kenmerken van de oplossingsrichtingen

	Oplossingsrichting KILOMETERS	Oplossingsrichting VOERTUIG	Oplossingsrichting ENERGIE	Oplossingsrichting FILTER
				
Maat	Gereden afstand met wegvoertuigen (voertuigkilometers, vkm)	Hoeveelheid energie die het voertuig gebruikt per gereden kilometer (MJ/km)	Hoeveelheid CO ₂ , NO _x , PM ₁₀ die ontstaat per eenheid energie die het voertuig gebruikt (CO ₂ etc./MJ)	Mate van filteren/afvangen van de uitlaatgassen (NO _x uitlaat/ NO _x verbranding)
Aangrijpingspunten	Minder verplaatsingen, kortere verplaatsingen, verplaatsingen met andere vervoermiddelen	Zuinig benzine/ dieselveertuig (zuinige motor, aerodynamisch, lichtgewicht), zuinig rijgedrag (acceleratie, snelheid), ander aandrijfsysteem	Inzet van alternatieve, schone brandstof/ energie	End-of-pipe
Causaliteit	Minder gereden (op de weg) → minder brandstof gebruikt → minder verbrandingsemissies en minder olieafhankelijkheid.	Minder energie gebruikt voor dezelfde afstand → minder brandstof gebruikt voor dezelfde afstand → minder verbrandingsemissies en minder olieafhankelijkheid voor dezelfde afstand.	1) Minder emissies uitgestoten bij de productie van energie voor het voertuig. 2) Andere brandstoffen gebruikt → minder olieafhankelijkheid.	Uitlaatgassen gefilterd → minder verbrandingsemissies vrijgekomen in de omgeving.
Effect op	CO ₂ , NO _x , PM ₁₀ , olieafhankelijkheid	CO ₂ , NO _x , PM ₁₀ , olieafhankelijkheid	CO ₂ , NO _x , PM ₁₀ , olieafhankelijkheid	NO _x , PM ₁₀

Voertuig

Oplossingsrichting VOERTUIG gaat over energiezuiniger rijden. Hierdoor wordt per gereden kilometer minder brandstof gebruikt en ontstaan er dus ook minder emissies van NO_x, PM₁₀ en CO₂. De maat voor deze oplossingsrichting is de benodigde energie per gereden kilometer (megajoule/km). Er geldt: hoe minder energie het rijden kost, hoe minder brandstof (olie) er wordt gebruikt, wat op zijn beurt leidt tot lagere olieafhankelijkheid en minder emissies.

Deze oplossingsrichting is hoofdzakelijk technisch van aard. Opties bij deze oplossingsrichting zijn bijvoorbeeld: een zuinige verbrandingsmotor (ICE) of een alternatief aandrijfsysteem zoals een elektromotor (die van zichzelf energiezuiniger is dan een verbrandingsmotor), een lichtgewicht voertuig en een aerodynamisch

voertuig. Ook het aanpassen van de rijsnelheid is een mogelijkheid die kan leiden tot een lager energiegebruik per kilometer en valt binnen deze oplossingsrichting.¹¹

Textbox 2.1

Hoe ontstaan CO₂, NO_x en PM₁₀?

CO₂ ontstaat bij de verbranding van koolstof (C)-houdende stoffen, zoals fossiele brandstoffen (olie, aardgas, steenkool) en organische materialen. CO₂ komt vrij in een vaste hoeveelheid per eenheid brandstof. Deze hoeveelheid is afhankelijk van de hoeveelheid koolstof in de brandstof. Zo veroorzaakt verbranding van een liter benzine altijd rond de 2,4 kilogram CO₂ en verbranding van een liter diesel altijd rond de 2,6 kilogram CO₂.

NO_x ontstaat bij een verbrandingsproces waar voldoende zuurstof aanwezig is, doordat in het verbrandingsproces de stikstof (N) in de lucht reageert met zuurstof (O). De hoeveelheid NO_x die ontstaat is niet vast, maar afhankelijk van de verbrandingstemperatuur: hoe hoger de temperatuur, hoe meer NO_x.

PM₁₀, ook wel fijn stof genoemd, is een verzamelnaam van allerlei kleine stofdeeltjes in de lucht. PM staat voor 'particulate matter' en de 10 duidt op de omvang van de deeltjes: kleiner dan 10 micrometer. De uitstoot van PM₁₀ door het verkeer gebeurt meestal in de vorm van roet. Dit roet ontstaat bij onvolledige verbranding van brandstof. De hoeveelheid PM₁₀ die vrijkomt bij verbranding is daarmee vooral afhankelijk van het verbrandingsproces en de brandstofsamenstelling.

Energie

Oplossingsrichting ENERGIE is technisch van aard en gaat over het inzetten van alternatieve energiedragers die minder emissies veroorzaken per eenheid energie die het voertuig gebruikt. Het gaat om alternatieven voor benzine en diesel. Hierdoor ontstaat ook minder olieafhankelijkheid. De maat voor deze oplossingsrichting is de uitstoot van CO₂, NO_x en PM₁₀ per eenheid energie (CO₂/MJ etcetera).

Omdat CO₂, NO_x en PM₁₀ ontstaan in verbrandingsprocessen, is energie die zonder verbrandingsproces wordt geproduceerd per definitie emissieloos. Voorbeelden hiervan zijn zonne- en windenergie. Verder kunnen bij verbrandingsprocessen veel of weinig emissies (per eenheid energie) ontstaan, afhankelijk van:

- de brandstofsoort: hoeveel koolstof zit erin, hoeveel verontreinigingen?
- het verbrandingsproces: wat is de verbrandingstemperatuur, is er sprake van onvolledige verbranding?

Zo levert verbranding van aardgas per eenheid energie minder CO₂ op dan verbranding van aardolie en dat weer minder dan verbranding van steenkool (Senternovem, 2004). Diesel en benzine, beide aardolieproducten, ontlopen elkaar weinig in hun CO₂-uitstoot per energie-eenheid, maar dieselgebruik levert over het algemeen wel hogere emissies van NO_x en PM₁₀ op. Bij de oplossingsrichting ENERGIE zijn dus zowel brandstofsoort als verbrandingsproces aangrijpingspunten. Onder de oplossingsrichting ENERGIE valt ook de grootschalige afvang en opslag

¹¹ Er kan over getwist worden of aanpassen van de rijsnelheid technisch is of (ook) gedragsmatig; het kan zowel via de techniek (snelheidsbegrenzer, intelligente voertuigen) als via gedragsaanpassing tot stand komen.

van CO₂ (CCS, *Carbon Capture and Sequestration*), bijvoorbeeld bij een elektriciteitscentrale. CCS zien we als integraal onderdeel van de energieproductie. Daarentegen valt afvang van stoffen op voertuigniveau niet onder deze oplossingsrichting, maar onder oplossingsrichting FILTER.

Oplossingsrichting VOERTUIG en ENERGIE komen in de praktijk vaak in vaste combinaties voor, omdat het type voertuig bepalend is voor de soort energie die kan worden gebruikt. Bijvoorbeeld een elektrisch voertuig heeft elektriciteit nodig, een brandstofcelvoertuig waterstof. In de uitvoeringspraktijk zijn de oplossingsrichtingen echter wel goed los van elkaar te zien. De actoren die betrokken zijn bij de oplossingsrichtingen VOERTUIG en ENERGIE zijn namelijk heel verschillend: bij oplossingsrichting VOERTUIG is de autoindustrie het belangrijkste, bij oplossingsrichting ENERGIE de energiesector.

Filter

Oplossingsrichting FILTER is technisch van aard en gaat over het filteren van de uitlaatgassen van voertuigen, zodat stoffen die ontstaan bij de verbrandingsprocessen in het voertuig, niet vrijkomen in de omgeving. Het is dus letterlijk een *end-of-pipe* oplossing. De mate van filtering is bepalend voor het effect van deze oplossingsrichting. De maat voor deze oplossingsrichting is de verhouding tussen de stoffen die de uitlaat uitkomen en de bij de verbranding geproduceerde stoffen (NO_x uitlaat/NO_x verbranding). Opties bij deze oplossingsrichting zijn technisch van aard: het gaat om inzet van katalysatoren, recirculatie van uitlaatgassen en dergelijke.

Deze oplossingsrichting wordt in de praktijk nu al veelvuldig ingezet om te kunnen voldoen aan de zogenoemde Euronormen, de steeds strenger wordende emissie-eisen die aan voertuigen worden gesteld, onder andere op het gebied van NO_x en PM₁₀.¹² Deze Euronormen worden nog steeds verder aangescherpt en hebben inmiddels een verregaande technische ontwikkeling uitgelokt en steeds lagere NO_x- en PM₁₀-emissies. Naar verwachting is de potentie van deze oplossingsrichting voor verdergaande emissiereductie ten opzichte van de referentiesituatie daarom gering. Om deze reden behandelen we deze oplossingsrichting minder diepgaand dan de andere oplossingsrichtingen.

2.2 Combineren van oplossingsrichtingen

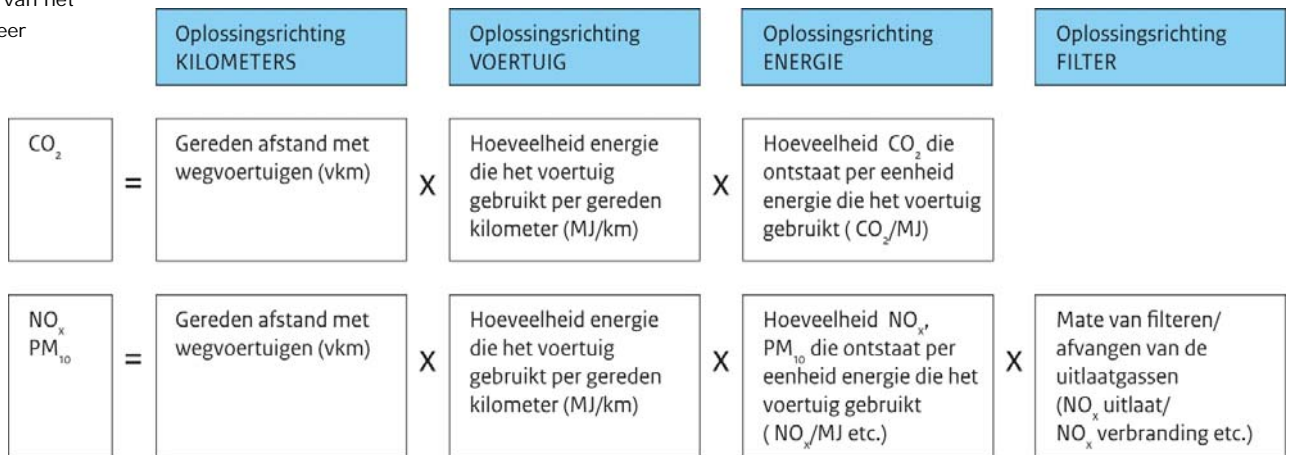
Wanneer de oplossingsrichtingen gelijktijdig worden toegepast, wordt hun gezamenlijk effect op de emissies bepaald door een vermenigvuldiging van de effecten van de afzonderlijke oplossingsrichtingen. Bij CO₂ gaat het om een vermenigvuldiging van de effecten van de eerste drie oplossingsrichtingen. De vierde oplossingsrichting is op CO₂ niet van toepassing, vanwege technische onhaalbaarheid om CO₂ op voertuigniveau uit de uitlaatgassen te filteren; afvang van CO₂ wordt in de literatuur alleen kansrijk geacht bij grootschalige puntbronnen van CO₂, zoals een elektriciteitscentrale¹³, en niet op voertuigniveau. De NO_x- en PM₁₀-uitstoot zijn een 'vermenigvuldiging' van alle vier de oplossingsrichtingen. Zie onderstaande tabel.

¹² Onder de Euronormen vallen de emissies van CO₂, koolwaterstoffen (KWS), NO_x en PM₁₀.

¹³ Dit is de eerdergenoemde CCS, die valt onder oplossingsrichting ENERGIE.

Figuur 2.1

Factoren die bepalend zijn voor emissies van het wegverkeer



Rekenvoorbeelden

Om duidelijk te maken hoe de factoren worden gebruikt, geven we twee rekenvoorbeelden.

- Gesteld dat het aantal voertuigkilometers (oplossingsrichting KILOMETERS), het energiegebruik per kilometer (oplossingsrichting VOERTUIG) en de CO₂-inhoud per eenheid energie (oplossingsrichting ENERGIE) elk met een kwart (25 procent) zijn afgenomen, dan is de CO₂-uitstoot niet met 75 procent (25 + 25 + 25) afgenomen, maar met circa 50 procent ($1 - \frac{3}{4} \times \frac{3}{4} \times \frac{3}{4} = \frac{37}{64}^{ste}$).
- In het theoretische geval dat met elk van de drie oplossingsrichtingen een halvering optreedt (binnen de betreffende maat: vkm, MJ/km en CO₂/MJ), dan neemt de CO₂-uitstoot ten opzichte van de referentie met 7/8 af ($1 - \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$).

3 Selectie van opties per oplossingsrichting

- *Per oplossingsrichting zijn op basis van het speelveld en de criteria in hoofdstuk 1 concrete opties geselecteerd.*
- *Opties bij de oplossingsrichting KILOMETERS zijn: thuiswerken en elektronisch vergaderen en winkelen door de inzet van ICT, een verschuiving van wegverkeer naar andere vervoermiddelen, verbetering van de logistiek in het vrachtverkeer, compacte steden/verdichting en hogere kilometerprijs in het wegverkeer.*
- *Opties bij de oplossingsrichting VOERTUIG zijn: zuinig benzine/dieselveertuig, emissieoptimale snelheid, slim voertuig (ITS) en een alternatief aandrijfsysteem (elektrisch voertuig en brandstofcelvoertuig).*
- *Opties bij de oplossingsrichting ENERGIE zijn: biobrandstof, emissiearme elektriciteit en emissiearme waterstof.*
- *Opties bij de oplossingsrichting FILTER zijn: roetfilter, selectieve katalytische reductie en uitlaatgascirculatie.*

Dit hoofdstuk geeft een beknopte beschrijving van de geselecteerde opties per oplossingsrichting. Er is gezocht binnen twee verschillende speelvelden.

De niet-technische opties bij de oplossingsrichting KILOMETERS, zijn gezocht binnen het speelveld zoals weergegeven in figuur 1.2. Het gaat hier om de vraag: wat zijn mogelijke opties binnen een gemiddeld beleidsscenario?

De technische opties bij de oplossingsrichtingen VOERTUIG, ENERGIE en FILTER, zijn gezocht binnen het speelveld zoals weergegeven in figuur 1.1. Hier is de vraag: wat is er technisch mogelijk?

Daarnaast zijn de selectiecriteria uit paragraaf 1.3 toegepast.

3.1 Opties oplossingsrichting KILOMETERS

Oplossingsrichting KILOMETERS gaat over 'minder rijden', het verminderen van het aantal voertuigkilometers op de weg (vkm). In deze paragraaf beschrijven we de opties die we bij deze oplossingsrichting geselecteerd hebben.

ICT¹⁴

Moderne communicatiemiddelen zoals internet, e-mail, videoverbindingen en sociale media, maken het mogelijk dat burgers en bedrijven voor veel activiteiten minder plaats- en tijdgebonden zijn. In potentie is er een groot effect mogelijk op de verplaatsingen. Als subopties onderscheiden we:

- **Thuis- en plaatsonafhankelijk werken:** ICT-toepassingen zoals (mobiel) internet en e-mail kunnen zorgen voor een afname van het woon-werkverkeer, omdat werknemers in staat zijn niet alleen op een vaste werkplek, maar ook thuis of elders hun werk te doen. Deze optie kan zowel individueel als op het niveau van een heel bedrijf worden toegepast.

¹⁴ Voluit heet deze optie: andere mobiliteitsbehoefte door ICT-toepassingen.

Technische aanpassingen alleen zijn vaak niet genoeg; ook de bedrijfs-cultuur en het HRM-beleid moeten veranderen.

- Elektronisch winkelen: Verplaatsingen met winkelen als motief kunnen afnemen door allerlei mogelijkheden om producten en diensten via het internet aan te schaffen (elektronisch winkelen). Transacties kunnen zich afspelen tussen bedrijf/webwinkel en consument (ook wel 'B2C', *business to consumer* genoemd), tussen consumenten onderling (C2C, zoals via Marktplaats) of tussen bedrijven (B2B). Nu al schat het Hoofdbedrijfschap Detailhandel (2010) in dat het aantal vierkante meters winkeloppervlakte door elektronisch winkelen in 2020 met 20-35 procent gereduceerd zal zijn. Overigens kan het aantal verplaatsingen van bezorgdiensten juist gaan toenemen.
- Elektronisch vergaderen: Het zakelijk verkeer¹⁵ kan afnemen via *videoconferencing*-faciliteiten, die het mogelijk maken te vergaderen zonder fysiek in één ruimte te zijn. Dit wordt op dit moment hoofdzakelijk gebruikt bij grote multinationals en internationale contacten, maar zou in 2050 op grotere schaal (ook bij binnenlandse contacten) en/of bij andere bedrijven een rol kunnen spelen.

Modal shift

Modal shift betekent een verandering in de vervoerwijzekeuze. Vaak betekent het de overgang van het gebruik van de auto (personen- of vrachtauto) naar andere modaliteiten als binnenvaart, trein, tram, bus, metro of fiets, met als gevolg een daling van het aantal wegvoertuigkilometers. Ook kan het gaan om de overgang van een unimodale naar een multimodale verplaatsing, bijvoorbeeld de combinatie auto-trein met P&R bij het station.

Verbeterde logistiek in het vrachtverkeer

Door betere planning en organisatie, maar ook technische aanpassingen aan vrachtwagens, is het in potentie mogelijk om met minder voertuigkilometers toch dezelfde hoeveelheid goederen over de weg te vervoeren. Dit wordt omschreven als 'verbeterde logistiek'. Concreet valt te denken aan meer samenwerking tussen vervoerders en verladers, efficiëntere belading en verpakking, betere routeplanning, gebruik van transportbedrijven in plaats van eigen vervoer, beter op elkaar afgestemde regels op het gebied van beleving binnensteden, venstertijden, inzet van langere vrachtwagens, betere 'deelbaarheid' tussen de trekkende eenheid en het laadgedeelte, het instellen van stedelijke distributiecentra en dergelijke (Bates, 2001 (verwijst naar IPM&ET, 1996); Dings, 2000; Lewis, 2010).

Compacte steden/verdichting

Veranderingen in de ruimtelijke inrichting kunnen invloed hebben op de verplaatsingen, zowel in kwantiteit als in keuze van het vervoermiddel. Deze veranderingen kunnen beide kanten op werken:

- Bij ruimtelijke spreiding (*urban sprawl*) zullen het aantal en de lengte van verplaatsingen mogelijk toenemen.
- Bij ruimtelijke verdichting, in de literatuur ook wel 'compacte steden' genoemd, zullen de verplaatsingen in aantal en lengte mogelijk juist afnemen, terwijl bovendien de mogelijkheden voor hoogkwalitatief openbaar vervoer en fiets- en loopvoorzieningen toenemen.

¹⁵ Specifieker: het zakelijk bezoek in de werksfeer, dus niet het woon-werkverkeer.

De literatuur is overigens niet eenduidig over de effecten van ruimtelijke verdichting. Volgens Kampman (2009) kiezen burgers en bedrijven hun woon-, werk- en bedrijfslocaties en vervoermiddel (fiets, lopen, auto, openbaar vervoer) mede op grond van de ruimtelijke indeling en de aanwezige infrastructuur. In een stedelijke omgeving met hoge bevolkingsdichtheid en gemengde functies, zoals scholen, winkels, medische voorzieningen, werkgelegenheid op loop- en fietsafstand of met een hoogkwalitatief openbaarvervoerssysteem, is het autobezit en -gebruik meestal lager dan in gebieden waar deze functies verder weg zijn (Kampman, 2004). Volgens Geurs (2006) zouden zonder de compacte stedelijke ontwikkelingen in Nederland het autogebruik en de verkeersemisssies groter zijn geweest. Bart (2009) noemt ruimtelijke spreiding zelfs als belangrijkste reden voor de toegenomen verkeersemisssies in de EU. Volgens Hilbers (2009) daarentegen zou het effect van geconcentreerde verstedelijking op de mobiliteit beperkt zijn en is het mobiliteitsgedrag veel beter te beïnvloeden door de hoogte van openbaarvervoerstarieven, kilometerbeprijzing en parkeertarieven. Volgens Coevering (2008) hebben gebrek aan parkeerruimte en aanwezigheid van openbaar vervoer weinig effect op de keuze om wel of niet de auto te nemen noch op de woonlocatiekeuze. Alleen in de *meest verstedelijkte gebieden* kan het relatief lage autobezit deels worden toegeschreven aan ruimtelijke factoren zoals parkeerplaatsen en openbaar vervoer.

Hogere kilometerprijs wegverkeer

Bij deze optie worden er minder kilometers gereden doordat mobiliteit – op een of andere manier - duurder is geworden. Er is een zekere relatie tussen 'de prijs van een reis' en hoeveel er gereden wordt (via een prijselasticiteit).

3.2 Opties oplossingsrichting VOERTUIG

Oplossingsrichting VOERTUIG gaat over energiezuiniger rijden (minder energiegebruik per gereden kilometer). De geselecteerde opties zijn technische opties, die te maken hebben met voertuigtechniek en rijsnelheid.

Zuinig ICE-voertuig

De huidige auto's en vrachtauto's zijn uitgerust met een interne verbrandingsmotor (*Internal Combustion Engine* of ICE) en werken op benzine of diesel als brandstof. Er is technisch potentieel om dit voertuigtype efficiënter te maken, bijvoorbeeld door een zuinigere verbrandingsmotor, hybridisering (de combinatie van de verbrandingsmotor met een elektromotor), een lager voertuiggewicht en een meer aerodynamische uitvoering.

Emissieoptimale snelheid

Ook aanpassing van de rijsnelheid (bijvoorbeeld via een snelheidsbegrenzer of door aanpassing van de wettelijke maximumsnelheid op wegen) biedt een technische mogelijkheid tot emissiereductie. De emissies van CO₂, NO_x en PM₁₀ hebben namelijk een komvormige relatie met de rijsnelheid: de vervuilende emissies zijn het laagst in de range van pakweg 40-100 km/u; bij lagere en hogere snelheden lopen de emissies op (Den Boer, 2004; Otten, 2009; Barth, 2010). Bijvoorbeeld bij 80 km/u zijn de CO₂-emissies per kilometer ongeveer 10 procent lager dan bij 100 km/u.

Slim voertuig (ITS)

Slimme voertuigen zijn voertuigen die zijn uitgerust met ICT-systemen die helpen bij of ingrijpen in de rijtaak. In het Engels worden deze systemen ITS genoemd, *Intelligent Transport Systems*. Te denken valt aan cruisecontrol-achtige systemen, die zorgen voor een gelijkmatige snelheid en gelijkmatige afstand van andere voertuigen, en systemen die helpen om complexe verkeerssituaties zoals kruispunten, te overzien. Ze kunnen zowel in personen- als in vrachtauto's worden toegepast. Sommige systemen zijn al commercieel verkrijgbaar, andere zijn nog in ontwikkeling. De ontwikkeling gebeurt meestal vanuit het oogpunt van veiligheid (voor inzittenden) en doorstroming van het verkeer en dus niet zozeer voor het milieu of voor brandstofbesparing. De nu bekende ITS-systemen kunnen worden ingedeeld in de volgende dimensies:

- Autonom (functioneert al bij één voertuig) of coöperatief (er is communicatie nodig tussen voertuigen onderling of tussen voertuig en wegwakant om te kunnen functioneren).
- Werkend op het hoofdwegennet (snelwegen) of juist op het onderliggend wegennet (met name op kruispunten).

In onderstaande tabel staan enkele van de nu bekende systemen, ingedeeld volgens de twee dimensies.

Tabel 3.1
Voorbeelden van
ITS-systemen.

	Autonom	Coöperatief
Hoofdwegen net	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Adaptive Cruise Control (ACC)</i> Zorgt ervoor dat het voertuig een korte afstand tot de voorligger aanhoudt en kan tegelijk werken als een standaard cruisecontrol (vasthouden van ingestelde snelheid). Dit is voor duurdere personenauto's nu al op de markt. • <i>Stop & Go</i> Systeem dat tijdens filerijden de besturing van een auto deels overneemt ter vergroting van het rijcomfort. • <i>Full Range ACC</i> Combinatie van ACC met Stop & Go. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Cooperative Adaptive Cruise Control (C-ACC)</i> Een uitbreiding van ACC, waarbij de snelheid van een voertuig wordt aangepast aan de acceleratie en deceleratie van de voorligger via communicatie tussen voertuigen. • <i>Platooning</i> (in pelotons rijden) Als uiteindelijk een groot deel van de voertuigen met C-ACC is uitgerust, kan er in pelotons worden gereden. Voertuigen rijden dan zoveel mogelijk op vaste snelheid achter elkaar. Dit vergt wel een verdere technische ontwikkeling, met name voor een soepel verloop bij discontinuïteiten zoals in- en uitvoegstroken.
Onderliggend wegennet	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Intersection Collision Avoidance (ICA)</i> Helpt weggebruikers die een (ongeregelde) kruising naderen, om de situatie te overzien. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Cooperative intersection collision avoidance systems (CICAS)</i> Helpt de automobilist volautomatisch om ongeregelde kruisingen veilig te passeren. Het voertuig geeft zelf een signaal af dat het een kruising nadert en pikt signalen van andere naderende voertuigen op.

Alternatieve aandrijfsystemen: elektrisch voertuig en brandstofcelvoertuig

Een alternatief voor de interne verbrandingsmotor (ICE) is de elektromotor. Dit motortype is veel energiezuiniger dan de ICE. Overigens is de elektromotor niet nieuw, maar bestaat al ongeveer net zo lang als de ICE.¹⁶ De elektromotor heeft elektriciteit als voeding nodig. Deze elektriciteit kan zowel binnen als buiten het voertuig worden geproduceerd. Deze optie is geschikt voor personenauto's, maar niet voor (langeafstands)vrachtauto's (zie hieronder).

In deze verkenning onderscheiden we twee opties:

- Een elektrisch voertuig. Dit voertuig 'tankt' elektriciteit, dat wil zeggen het voertuig moet vóór het rijden worden opgeladen met elektriciteit uit het stopcontact, die wordt opgeslagen in een accu. De elektriciteitsproductie vindt dus buiten het voertuig plaats. De grootte van de accu is bepalend voor de actieradius van het voertuig.
- Een brandstofcelvoertuig. Dit voertuig tankt waterstof en heeft een brandstofcel aan boord die waterstof omzet in elektriciteit voor de elektromotor. De elektriciteitsproductie vindt dus binnen het voertuig plaats.

Een elektrisch voertuig stoot tijdens het rijden geen emissies uit, maar er kunnen wel emissies ontstaan bij de productie van de elektriciteit. Dus op een andere plek dan waar het voertuig rijdt. Ook een brandstofcelvoertuig stoot tijdens het rijden geen emissies uit (behalve onschuldige waterdamp), terwijl in het productieproces van de waterstof (dus elders) wel emissies kunnen zijn ontstaan. Oftewel: de *tank-to-wheel*-emissies van elektrische en brandstofcelvoertuigen zijn nihil, maar de *well-to-tank*-emissies mogelijk niet; deze laatste categorie komt aan bod bij de oplossingsrichting ENERGIE. Doordat de voertuigen op de weg geen vervuillende stoffen uitstoten, kan de lokale luchtkwaliteit verbeteren.

Elektriciteit en waterstof zijn veel minder energiedicht dan diesel en benzine (o.a. King, 2007, p.26). Ze vergen daarom per eenheid energie meer opslagcapaciteit dan diesel en benzine. Dit maakt elektrische en brandstofcelvoertuigen minder geschikt voor vrachtvervoer, zeker als er sprake is van langeafstandstransport (Skinner, 2010; Hoen, 2009; Hanschke, 2009, p.12; PBL, 2009, p.75). Door hun omvang en zwaarte gebruiken vrachtwagens per kilometer sowieso al veel meer energie dan een personenauto. Bij lange afstanden zou een enorm grote, zware accu of waterstofopslagtank nodig zijn, wat niet praktisch is.

Behalve elektrische en het brandstofcelvoertuigen zijn nog andere alternatieve voertuigen mogelijk, zoals hybride en plug-in hybride voertuigen. Deze vallen binnen deze verkenning onder de optie 'zuinig ICE-voertuig', omdat nog steeds sprake is van een interne verbrandingsmotor.¹⁷

¹⁶ De elektromotor is in de 19^e eeuw ontwikkeld en had gedurende enkele decennia zelfs een groter aandeel in het aantal voertuigen dan de ICE. Pas rond 1920 werd de ICE dominant en verdween de elektrische auto langzaam uit het straatbeeld (Pridmore, 2010, p.27).

¹⁷ Een hybride heeft twee motoren, een ICE en een elektromotor. De ICE-motor (gevoed met benzine/diesel, aardgas en dergelijke) drijft in het voertuig een generator aan die de elektriciteit produceert voor de elektromotor. De elektriciteitsproductie vindt dus binnen het voertuig plaats. Een hybride heeft een kleine accu. De plug-in hybride heeft net als de 'gewone' hybride twee motoren, een interne verbrandingsmotor en een elektromotor. 'Plug-in' slaat op het feit dat er ook elektriciteit rechtstreeks via het stopcontact kan worden ingevoerd. Bij een plug-in hybride is dus sprake van een mix van elektriciteitsproductie binnen en buiten het voertuig. De verbrandingsmotor met brandstoftank van de plug-in hybride wordt ook wel *range extender* genoemd.

3.3 Opties oplossingsrichting ENERGIE

Oplossingsrichting ENERGIE gaat over alternatieve brandstoffen/energie, die niet gebaseerd zijn op olie en die minder emissies veroorzaken. In deze paragraaf beschrijven we de opties die we binnen deze oplossingsrichting geselecteerd hebben. Dit zijn technische opties.

Biobrandstof

Biobrandstof is een verzamelnaam voor brandstoffen die worden gemaakt uit biomassa/organisch materiaal. Ze kunnen zowel vloeibaar als gasvormig zijn. Enkele ervan lijken qua chemische eigenschappen op de conventionele transportbrandstoffen (ethanol - benzine, biodiesel – diesel), zodat ze tegen geen of een geringe aanpassing kunnen worden gebruikt door een ICE-motor en passen bij de huidige infrastructuur van tankstations. Zie onderstaande tabel voor een overzicht van biobrandstoffen voor benzine- en dieselveertuigen.

Tabel 3.2

Verskillende soorten
biobrandstof
(Verbeek, 2008)

Benzinevoertuig	Dieselveertuig
<ul style="list-style-type: none"> • ethanol • bio ETBE • biopetrol • butanol • methanol 	<ul style="list-style-type: none"> • FAME (<i>fatty acid methyl ester</i>) (biodiesel) • <i>Hydrotreated vegetable oil</i> (HVO) • <i>Biomass-to-liquid</i> (BTL) • Ethanol met ontstekingsverbeteraar • Puur plantaardige olie (PPO) • Methanol met ontstekingsverbeteraar • Dimethyl-ether (DME)

Gebruik van biobrandstof kan zorgen voor een CO₂-reductie ten opzichte van gebruik van fossiele brandstof. Biobrandstof bevat weliswaar koolstof (C), zodat bij verbranding automatisch CO₂ ontstaat, maar eenzelfde hoeveelheid CO₂ is tijdens het groeiproces van de biomassa, in het proces van fotosynthese, opgenomen uit de atmosfeer. Omdat er in het productieproces van de biobrandstof ook broeikasgassen vrijkomen (bijvoorbeeld N₂O door kunstmestgebruik, CO₂ die ontstaat door energiegebruik bij het oogsten, het transport en de raffinage), is de CO₂-balans over het algemeen niet nul.¹⁸ Op NO_x en PM₁₀ kan toepassing van biobrandstof zowel een positief als een negatief effect hebben (Verbeek, 2008). Dit effect – zowel het positieve als het negatieve – wordt over het algemeen minder naarmate het voertuig aan een scherpere Euronorm voldoet, omdat dan al veel emissies van NO_x en PM₁₀ worden verwijderd via roetfilters, deNOx-installaties en dergelijke.¹⁹ Het effect van het soort brandstof dat wordt gebruikt neemt daardoor af. Bij Euro 6 (personenauto's) en Euro VI (vrachtauto's) levert het gebruik van biobrandstof naar verwachting geen tot nauwelijks effecten meer op de NO_x- en PM₁₀-uitstoot.

Op dit moment wordt in benzine/diesel op grond van een Europese verplichting al een paar procent biobrandstof bijgemengd. Het betreft biobrandstof van de zogenoemde eerste generatie. Deze wordt via conventionele chemische processen of vergisting gemaakt uit suikers, zetmeel, plantaardige olie en dergelijke, grondstoffen die ook als voedsel kunnen dienen. Dit kan conflicten opleveren met de wereldwijde voedselvoorziening, bijvoorbeeld doordat voedselprijzen stijgen en

¹⁸ In internationale statistieken wordt de broeikasgasemissie van biobrandstoffen wel vaak op nul gezet (bijvoorbeeld in de IPCC-rekenmethode ten behoeve van het Kyoto-protocol).

¹⁹ Dit valt in deze verkenning onder de oplossingsrichting FILTER.

er minder landbouwgrond beschikbaar is voor voedselgewassen. Ook de biodiversiteit kan in het geding zijn (monoteelt, kap van bossen voor bouwland). De broeikasgasbalans van deze eerste generatie biobrandstof (over de hele keten gemeten) varieert sterk, afhankelijk van de soort biobrandstof, maar is over het algemeen niet zo gunstig. Het Planbureau voor de Leefomgeving noemt een bandbreedte in de CO₂-uitstoot van -40 procent tot zelfs +180 procent ten opzichte van fossiele brandstof (PBL, 2010).

De biobrandstof van de tweede generatie wordt niet uit voedselgewassen gemaakt, maar uit planten die hiervoor geteeld worden (energiegewassen) of uit oneetbare gedeelten van voedselgewassen. De duurzaamheidsproblemen die optreden bij de eerste generatie spelen hier daarom een minder grote rol (Hanschke, 2009). Ook de CO₂-balans is gunstiger (EUCAR/JRC/CONCAWE, 2008). Tweede generatie biobrandstoffen zijn veel ingewikkelder om te maken dan de eerste generatie: de biomassa waaruit ze worden gemaakt bevat vaak cellulose en dat is moeilijk om te zetten in energie.²⁰ Tweede generatie biobrandstof is nog niet commercieel beschikbaar, maar is nog in ontwikkeling.

Bij grootschalige inzet zal de benodigde biomassa voor het overgrote deel niet in Nederland verbouwd kunnen worden, maar de biomassa (of biobrandstof) zal geïmporteerd moeten worden.

Emissiearme elektriciteit

Het gaat hier om de elektriciteit die wordt gebruikt in elektrische voertuigen, dus de voertuigen die vóór het rijden moeten worden opgeladen met elektriciteit. Elektriciteit kan op veel verschillende manieren en uit veel verschillende energiebronnen worden geproduceerd. De emissies die hierbij vrijkomen zijn de *well-to-wheel*-emissies van het elektrische voertuig. Om hoevél emissies het gaat, is afhankelijk van het productieproces van de elektriciteit. Elektriciteit wordt momenteel in Nederland gemaakt met een mix van kolen-, gas- en kerncentrales en uit duurzame bronnen zoals windturbines, zonnepanelen en biomassa-installaties. Olie wordt in Nederland niet of nauwelijks ingezet in de elektriciteitsproductie.

Emissiearme waterstof

Het gaat hier om de waterstof die wordt gebruikt in brandstofcelvoertuigen.²¹ De emissies die ontstaan bij het produceren van de waterstof zijn de *well-to-wheel*-emissies van het brandstofcelvoertuig. Momenteel wordt waterstof al op grote schaal gebruikt in de industrie, bijvoorbeeld voor de productie van ammoniak, het koelen van generatoren en dergelijke. De conventionele manier van waterstof produceren is uit aardgas, via een proces dat SMR (*Steam Methane Reforming*) wordt genoemd. Een andere mogelijke manier van produceren is bijvoorbeeld via elektrolyse. Bij elektrolyse wordt met behulp van elektriciteit water (H₂O) gescheiden in zuurstof (O₂) en waterstof (H₂). De benodigde elektriciteit kan weer met een grote range aan productieprocessen en energiebronnen gemaakt worden.

²⁰ Enkele nu bekende procédés zijn Fischer-Tropsch (FT)-synthese, waarbij vergaste biomassa wordt omgezet in vloeibare brandstof en *Hydro Thermal Upgrading* (HTU), waarbij biomassa onder hoge druk wordt omgezet in olie. FT-diesel kan zonder motoraanpassing worden ingezet in ICE-voertuigen.

²¹ De optie dat waterstof rechtstreeks wordt verbrand in een interne verbrandingsmotor nemen we niet mee vanwege het geringe effect op de vermindering van emissies.

Alternatieven voor olie die we buiten beschouwing laten

Ook aardgas en steenkool kunnen dienen als alternatief voor olie. Via *coal-to-liquid* en *gas-to-liquid* processen kunnen aardgas en steenkool worden omgezet in diesel en benzine (o.a. Persson, 2011). Hoewel hierdoor de olieafhankelijkheid kan worden verminderd, gaan we hier in deze verkenning niet op in omdat onconventionele olie²² over het algemeen hogere CO₂-emissies heeft dan conventionele olie (IEA, 2010).

Ook rijden op aardgas onder druk (CNG, *compressed natural gas*) nemen we niet mee, omdat het maar een marginaal CO₂-voordeel oplevert ten opzichte van benzine en diesel en ook het voordeel voor de luchtkwaliteit met de aanscherping van de Euronormen steeds kleiner wordt. CNG wordt soms wel genoemd als wegbereider voor toepassing van groen gas²³, dat wel CO₂-voordeel heeft (Hanschke, 2009). Groen gas behandelen we echter ook niet apart, omdat het feitelijk ook een biobrandstof is (zij het gasvormig) en het concurreert om dezelfde biomassa met FT-diesel.

3.4 Opties oplossingsrichting FILTER

Oplossingsrichting FILTER gaat over het afvangen/filteren van NO_x- en PM₁₀-emissies in het voertuig (de uitlaat) zodat ze niet in de uitlaatgassen terecht komen. Afvang van CO₂ op het niveau van een voertuig is technisch niet mogelijk of alleen tegen extreme kosten en is daarom geen reële optie. Met deze oplossingsrichting is in principe veel emissiereductie mogelijk. De opties die we in de literatuur hebben gevonden worden echter in de referentiesituatie ook al benut en leveren dus geen extra potentieel. Daarom zijn we er hier kort over. Alle hieronder genoemde opties zijn bestemd voor dieselveertuigen. Benzineauto's hebben sowieso een veel geringere uitstoot van NO_x en PM₁₀. Dieselveertuigen zijn bezig met een inhaalslag.

Roetfilter

Fijn stof (PM₁₀) ontstaat als dieselbrandstof niet volledig wordt verbrand. Door het aanbrengen van een roetfilter in de uitlaat kunnen roetdeeltjes worden tegengehouden.

Selectieve katalytische reductie (SCR)

De NO_x-uitstoot van een dieselmotor kan met een speciaal daarvoor ontwikkelde katalysator worden afgevangen. In dit proces van selectieve katalytische reductie (SCR) wordt ureum gebruikt. Voor toepassing van SCR moeten voertuigen uitgerust worden met een speciale ureumtank. Daarnaast moet een ureumdistributiesysteem worden ingericht. De ureum moet namelijk 'getankt' worden. De SCR-techniek werd tot voor kort alleen toegepast in zware bedrijfsauto's die aan de Euro-4- en Euro-5-normen voldoen, maar wordt inmiddels ook bij enkele personenauto's gebruikt (Bovag II, 2008). Het zwavelgehalte van de brandstof moet zeer laag zijn (minder dan 10 *parts per million*).

²² Tot de onconventionele olie wordt naast *coal-to-liquids* en *gas-to-liquids* bijvoorbeeld ook zandolie, *extra-heavy oil* en schalieolie gerekend (IEA, 2010).

²³ Hanschke (2009) onderscheidt twee vormen van groen gas:

- Biogas: een vergistingproduct dat wordt gemaakt uit afvalstromen zoals mest, rioolslib en reststoffen uit de voedingsmiddelenindustrie.
- SNG (*synthetic natural gas*): synthetisch gas, dat wordt gemaakt uit vergassing van houtachtige biomassa, dezelfde soort biomassa die ook via het Fischer-Tropsch-proces omgezet kan worden in biodiesel.

Uitlaatgasrecirculatie (Exhaust Gas Recirculation, EGR)

Dit is een bekende techniek om de NO_x-emissie van verbrandingsmotoren te verminderen. Een deel van de uitlaatgassen wordt teruggevoerd naar de inlaat van de motor, waardoor de verbrandingstemperatuur omlaag gaat en minder NO_x ontstaat. Dit is dus fundamenteel anders dan bij SCR, waar de NO_x wel ontstaat maar vervolgens wordt verwijderd.

4 Effect van oplossingsrichting KILOMETERS

- *Het aantal voertuigkilometers (en daarmee emissies en olieafhankelijkheid) is bij een gemiddeld beleidsscenario naar schatting met zo'n 10 à 20 procent te verminderen ten opzichte van de referentiesituatie. Dit is onvoldoende om de verwachte groei van het aantal voertuigkilometers tussen 2010 en 2050 in de referentiesituatie goed te maken.*
- *Bij personenauto's zijn meer mogelijkheden dan bij vrachtauto's.*
- *Van de onderzochte opties heeft een hogere kilometerprijs in het wegverkeer de grootste potentie (met name voor personenauto's), elektronisch winkelen en vergaderen de minste.*

Dit hoofdstuk gaat over het effect van de opties binnen oplossingsrichting KILOMETERS op emissies en olieafhankelijkheid van het wegvervoerssysteem, doorstroming en verkeersveiligheid. Bij het inschatten van de effecten is ervan uitgegaan dat het speelveld waarbinnen de opties liggen, is begrensd door een zeker beleid (zie figuur 1.2), dat het midden houdt tussen 'zeer bescheiden' en 'zeer intensief'. De genoemde effecten zijn dus niet het theoretisch maximum.

4.1 Overzicht van effecten

In tabel 4.1 geven we een overzicht van het positieve of negatieve effect van de opties van oplossingsrichting KILOMETERS op emissies, olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming. De scores zijn afgezet tegen de referentiesituatie: voortzetting van het huidige beleid. De onderbouwing van de scores staat in paragraaf 4.2.

Zoals blijkt uit tabel 4.1 hebben alle opties van de oplossingsrichting KILOMETERS een positief effect op de emissies en olieafhankelijkheid; dit is ook logisch omdat reductie van emissies/olieafhankelijkheid een belangrijk criterium was voor het selecteren van opties. Omdat de vermindering van emissies en olieafhankelijkheid plaatsvindt via het verminderen van wegvoertuigkilometers is het effect op verkeersveiligheid en doorstroming van het wegverkeer ook vrijwel altijd positief.

De negatieve effecten op de verkeersveiligheid die zich kunnen voordoen bij de *modal shift* en compacte steden, kunnen in de praktijk worden weggenomen door specifieke verkeersveiligheidsmaatregelen, bijvoorbeeld het verbeteren van de verkeersveiligheid rondom stations.

Tabel 4.1
Kwalitatief effect van
onderzochte opties
van
oplossingsrichting
KILOMETERS

	Emissies/ Olieafhankelijkheid	Verkeersveiligheid	Doorstroming
ICT			
• Thuis- en plaatsonafhankelijk werken	+	+	+
• Elektronisch winkelen	+ *)	+ *)	+ *)
• Elektronisch vergaderen	+	+	+
Verschuiving van wegverkeer naar andere vervoermiddelen	+	+/- (- bij voor/natransport openbaar vervoer)	+
Verbeterde logistiek vrachtverkeer	+	+	+
Compacte steden/verdichting	+	+/-	+/-
Hogere kilometerprijs wegverkeer	+	+	+

+ = beter dan referentiesituatie; 0 = gelijk aan referentiesituatie; - = slechter dan referentiesituatie

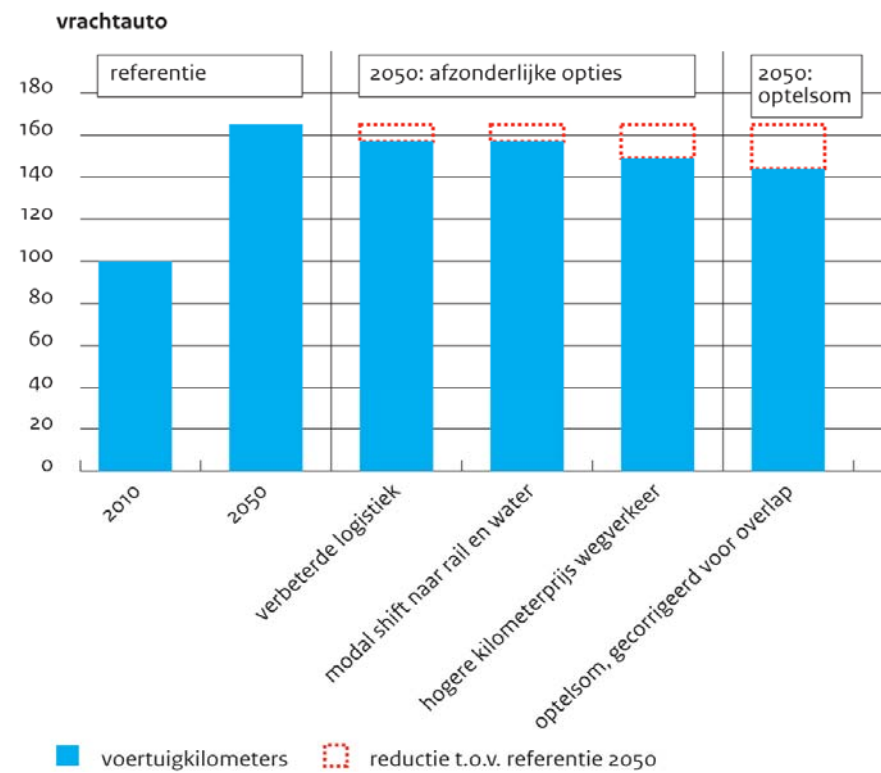
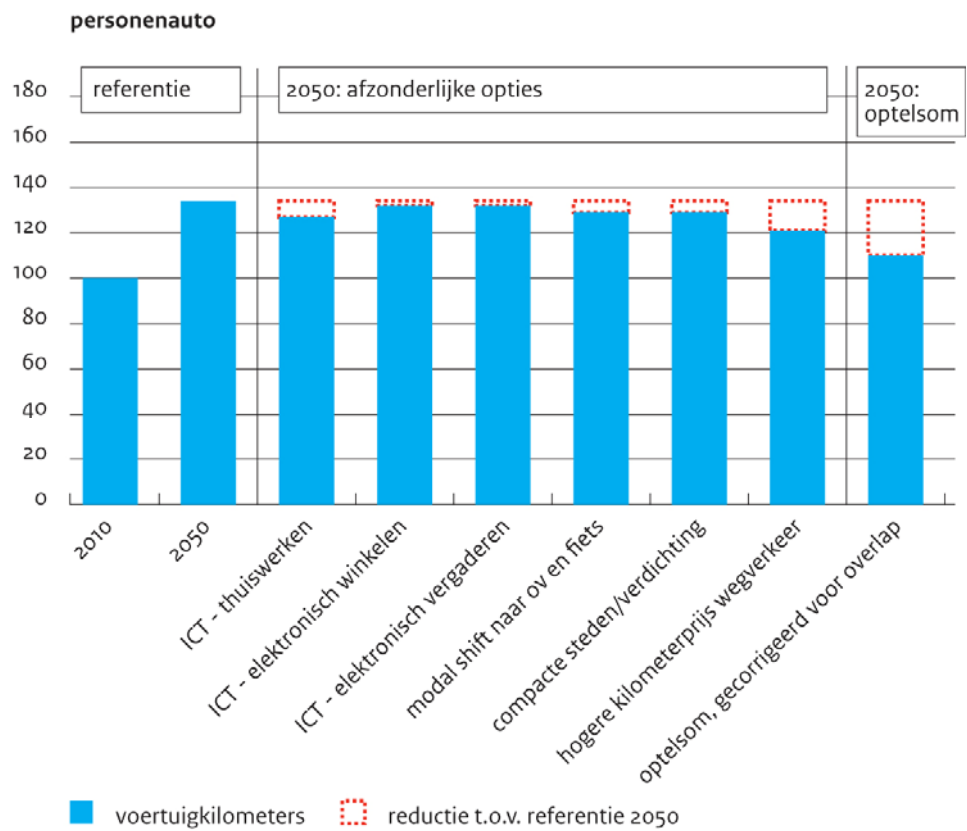
*) mits er een oplossing komt voor thuisbezorging/besteldiensten.

Het kwantitatieve effect van de verschillende opties van oplossingsrichting KILOMETERS is te vinden in figuur 4.1. Het gaat om een ordegrrootte van reductie van voertuigkilometers in 2050 ten opzichte van de referentiesituatie. Weergegeven zijn zowel het effect van de opties afzonderlijk, als van een combinatie van de opties. In het laatste geval is gecorrigeerd voor overlap tussen de opties.

Zoals te zien is in de figuur, heeft de optie 'hogere kilometerprijs wegverkeer' de grootste potentie, wat op zich niet zo verwonderlijk is omdat het een zeer brede optie is, met potentiële invloed op zeer veel verplaatsingen met verschillende motieven. Elektronisch vergaderen heeft de kleinste potentie. De gezamenlijke reductie van voertuigkilometers is onvoldoende om de groei van het aantal voertuigkilometers tussen 2010 en 2050 in de referentiesituatie goed te maken.

Figuur 4.1

Kwantitatief effect (ordegrootte; 2010=100) op voertuigkilometers van onderzochte opties van oplossingsrichting KILOMETERS: afzonderlijk en gezamenlijk, afgezet tegen de referentiesituatie
 Bron: zie paragraaf 4.2 en eigen analyse KIM



4.2 Effect op emissies, verkeersveiligheid en doorstroming per optie

In deze paragraaf gaan we voor elk van de opties van oplossingsrichting KILOMETERS in op het specifieke effect op de emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming.

ICT

Zoals nog maar tien jaar geleden niemand kon vermoeden welke rol sociale media anno nu zouden spelen, zo is het nu moeilijk in te schatten hoe groot over veertig jaar de impact van ICT op de mobiliteit zal zijn en in potentie kan zijn. Zelfs is moeilijk in te schatten of het aantal verplaatsingen en het aantal voertuigkilometers door ICT juist toe- of afneemt. Er zijn tegengestelde bewegingen mogelijk, zoals deze voorbeelden duidelijk maken:

- We bestellen steeds meer goederen en diensten via internet, zodat we zelf de deur niet meer uit hoeven. Tegelijk neemt het aantal bezorgdiensten toe, wat weer een groei van de mobiliteit betekent.
- Via sociale netwerksites staan we in contact met onze vrienden en maken we nieuwe contacten, zodat we voor contact dus niet persé de deur uit hoeven, maar tegelijk maken we via de sites juist afspraken om elkaar te ontmoeten.

Er is met de blik van nu een inschatting gemaakt van het toekomstpotentieel van de drie subopties binnen de categorie ICT:

ICT – Thuis- en plaatsafhankelijk werken

Ingeschat wordt dat de potentie om overdag thuis te werken voor de huidige beroepsbevolking ongeveer drie miljoen werknemers bedraagt (Blauw Research, 2010; TNS Nipo, 2010). Veel deskundigen gaan ervan uit dat de verdere ontwikkeling aan grenzen gebonden is. Vooral door de menselijke behoefte aan fysieke contacten zullen de meeste werknemers, zelfs met geavanceerde ICT-toepassingen, maximaal twee of drie dagen per week thuiswerken.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming van het wegverkeer:

- Emissies/olieafhankelijkheid
Wanneer drie miljoen werknemers één dag per week thuiswerken vermindert dat het aantal kilometers van personenauto's met ongeveer 5 procent.²⁴ Dit is het directe effect. Op den duur zal het aantal voertuigkilometers in de praktijk misschien minder sterk dalen, doordat werknemers verder van hun werk gaan wonen of meer of langere sociaal-recreatieve verplaatsingen gaan maken (Martens, 2002). Dit is het indirecte effect. De lengte van dit laatste type verplaatsingen is echter meestal veel korter dan die van de woon-werkverplaatsingen. Over het algemeen wordt verwacht dat de directe effecten aanzienlijk groter zullen zijn dan de indirecte effecten en dat het aantal voertuigkilometers door thuiswerken netto afneemt.

²⁴ Voor één miljoen werknemers die één dag per week thuiswerken is de afname van het woon-werkverkeer circa 5 procent (Kouwenhoven, 2005). Het woon-werkverkeer neemt circa 35 procent van het totale aantal personenvoertuigkilometers voor zijn rekening. Drie miljoen werknemers die één dag per week thuiswerken levert dus ca. $3 \times 5 \text{ procent} \times 35 \text{ procent} = 5 \text{ procent}$ reductie van personenvoertuigkilometers op.

- **Verkeersveiligheid**
Er zijn geen praktijkeffecten bekend, maar waarschijnlijk is dat de verkeersveiligheid toeneemt door vermindering van het aantal voertuigkilometers.
- **Doorstroming**
Thuiswerken heeft een gunstig effect op congestie, omdat woon-werkverplaatsingen vooral in de spits gemaakt worden. Het hoofddoel van beleid dat thuiswerken stimuleert, bijvoorbeeld het Nieuwe Werken, is dan ook vaak het bestrijden van congestie. Het KiM (2010) heeft recent laten zien dat een beperkte daling (1 procent) in de verkeersvraag tot een sterke reductie (10 procent) van de congestie leidt. Dit komt doordat veel wegen nu aan hun maximumcapaciteit zitten. Een reductie van 5 procent in het aantal woon-werkverplaatsingen zal op specifieke locaties tot een reductie van circa 10 à 15 procent van de congestie kunnen leiden; de vijfde procent daling in de vervoersvraag levert een kleinere reductie in congestie op dan de eerste procent (eigen analyse KiM).

ICT - Elektronisch winkelen

We beschouwen hier met name elektronisch winkelen door consumenten (B2C, *business to consumer*).²⁵ Dit is een sterke groeisector. In 2009 maakte B2C al 7-8% van de totale omzet van de detailhandel uit (Hoofdbedrijfschap Detailhandel, 2010a). In 2007 merkten winkelgebieden voor dagelijkse aankopen nog geen negatief effect op hun aanloop en omzet; winkelgebieden voor niet-dagelijkse artikelen en grotere aankopen soms al wel (Weltevreden, 2007). Het Hoofdbedrijfschap Detailhandel (2010) verwacht dat in 2020 het aantal vierkante meters winkelloppervlakte met 20-35% gereduceerd zal zijn. Dit zal samengaan met een sterke afname van het aantal winkelverplaatsingen en daarmee ook het aantal voertuigkilometers met winkelen als reismotief.

De potentie voor vermindering van het aantal voertuigkilometers in 2050 is lastig in te schatten. Tijdens een winkelverplaatsing wordt vaak meer dan één winkel bezocht; de oorspronkelijke winkelverplaatsing wordt misschien gewijzigd, maar komt niet persé geheel te vervallen. Bovendien neemt het goederenvervoer naar huishoudens toe als gevolg van het thuisbezorgen van artikelen. Ook worden artikelen vaak meerdere keren op een adres aangeboden omdat de ontvanger niet thuis is. Daarnaast kan het retourneren van artikelen extra verplaatsingen opleveren.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- **Emissies/olieafhankelijkheid**
We schatten in dat het potentieel voor reductie van het aantal voertuigkilometers met winkelen als reismotief in 2050 ongeveer 10 à 20 procent bedraagt (eigen analyse KiM). Aangezien het winkelverkeer circa 10 procent van het aantal personenautokilometers op de weg voor zijn rekening neemt (MON, 2009), geeft dit een potentieel effect op het aantal personenvoertuigkilometers (en daarmee op de emissies en olieafhankelijkheid) van 1 à 2 procent. Hierbij is er vanuit gegaan dat er een oplossing komt voor het bezorgen van goederen aan huis.

²⁵ Andere mogelijke vormen zijn *business to business* (B2B) en *consumer to consumer* (C2C), maar dit zijn kleinere categorieën.

- Verkeersveiligheid
Er zijn geen praktijkeffecten bekend, maar waarschijnlijk is dat de verkeersveiligheid toeneemt door vermindering van het aantal voertuigkilometers.
- Doorstroming
Idem.

ICT - Elektronisch vergaderen

Technische faciliteiten voor elektronisch vergaderen (*videoconferencing*) maken een snelle ontwikkeling door. *Videoconferencing* sluit aan bij maatschappelijke ontwikkelingen, zoals de vele files en de aandacht voor duurzaam ondernemen. In de toekomst zal *videoconferencing* daarom waarschijnlijk steeds vaker als substituut voor binnenlandse verplaatsingen worden gebruikt. Het potentieel in 2050 is moeilijk in te schatten. Of elektronisch vergaderen geschikt is en zo ja in welke vorm, hangt af van het soort activiteit dat men wil uitvoeren. Is het bijvoorbeeld nodig om de lichaamstaal van mensen te kunnen waarnemen? Is er fysiek contact noodzakelijk of is het elektronisch uitwisselen van documenten voldoende? Hierbij spelen ook de duur van het contact, de termijn waarop het contact moet plaatsvinden en de mate waarin de gesprekspartners elkaar kennen een rol (Crowther, 2009).

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- Emissies/olieafhankelijkheid
We schatten in dat elektronisch vergaderen op de lange termijn het aantal zakelijke autokilometers met 10 à 20 procent kan verminderen (eigen analyse KiM). Aangezien het zakelijk autoverkeer circa 10 procent van het totale aantal kilometers met personenvoertuigen voor zijn rekening neemt (MON, 2009), is er een effect van 1 à 2 procent van het aantal personenvoertuigkilometers.
- Verkeersveiligheid
Er zijn geen praktijkeffecten bekend, maar waarschijnlijk is dat de verkeersveiligheid toeneemt door vermindering van het aantal voertuigkilometers.
- Doorstroming
Idem.

Modal shift

Modal shift van het wegverkeer naar een andere modaliteit (tram, bus, metro, trein, fiets en binnenvaart) vindt plaats wanneer het wegverkeer relatief onaantrekkelijk wordt ten opzichte van het alternatief. Dit kan zowel door prijs- als kwaliteitsverschillen tussen het wegverkeer en die andere modaliteit tot stand komen. Kwaliteitsverbeteringen zijn bijvoorbeeld een uitbreiding van het openbaar vervoernet, een hogere frequentie waarmee gereden wordt, meer of betere zitplaatsen en dergelijke. Omdat de omvang van de *modal shift* afhankelijk is van de grootte van deze prijs- en kwaliteitsverschillen is het effect op emissies en olieafhankelijkheid niet eenduidig aan te geven. Zoals aangegeven in hoofdstuk 1 zijn we voor de niet-technische opties in deze verkenning uitgegaan van een gematigd beleidsscenario. Dat wil in dit geval zeggen: geen extreme prijs- of kwaliteitsverschillen.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- Emissies/olieafhankelijkheid²⁶
In de literatuur wordt ingeschat dat de omvang van *modal shift* bij personenvervoer en goederenvervoer hooguit enkele procenten bedraagt (o.a. PBL, 2009). PRC (2007a) en Groot (2007) geven voor de *modal shift* vanuit het goederenvervoer over de weg naar spoor of binnenvaart zo'n 5 procent als maximum. We gaan in deze verkenning uit van een effect (verschuiving van personen- en vrachtauto naar andere modaliteiten) van 2 à 5 procent.
- Verkeersveiligheid
Bij een *modal shift* van de personenauto naar het openbaar vervoer zal de verkeersveiligheid toenemen door gebruik van het openbaar vervoer sec. Het voor- en natransport heeft echter weer een (gedeeltelijke) afname van de verkeersveiligheid tot gevolg, bijvoorbeeld in het geval van meer fietsgebruik (Stipdonk, 2010). Bij een *modal shift* van de vrachtwagen naar spoor en water neemt de verkeersveiligheid op de weg logischerwijs toe, door vermindering van het aantal vrachtwagenbewegingen.
- Doorstroming
De doorstroming op de weg zal door het gebruik van andere vervoermiddelen dan (vracht)auto's verbeteren.

Verbeterde logistiek in het vrachtverkeer

Net als bij *modal shift* geldt dat effecten pas optreden wanneer de (vanuit emissieoptiek) verbeterde logistiek relatief aantrekkelijk wordt ten opzichte van de huidige logistiek. De omvang van het effect hangt af van de mate van aantrekkelijkheid. Deze wordt op haar beurt bepaald door het gevoerde beleid. In deze verkenning zijn we uitgegaan van een gemiddeld beleidsscenario, dus geen extreme prijsprikkels, ge- en verboden. Hieronder zoomen we nader in op het potentiële effect van de subopties 'verbeterde benuttingsgraad' en 'inzet van langere en zwaardere vrachtwagens (LZV's)'.

Het effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- Emissies/olieafhankelijkheid
In de geraadpleegde literatuur worden voor een verbeterde benuttingsgraad verschillende potentiële effecten genoemd. Een studie van CE Delft uit 1996 geeft een potentieel effect van 8 procent op CO₂ en NO_x (IPM&ET, 1996 in Dings, 2000). In een update van deze studie uit 2000 wordt aangegeven dat sinds 1996 al veel logistieke verbeteringen hebben plaatsgevonden (Dings, 2000). Francke noemt een potentieel effect van 0 tot 10 procent (Francke, 2009). Het is overigens onduidelijk welk deel van het potentieel nu al is gerealiseerd en dus niet meer beschikbaar is (Lensink, 2007).
Op het gebied van LZV's laat ex-postonderzoek in Nederland (Arcadis, 2006;

²⁶ Deze verkenning is gericht op de emissies van het wegverkeer en niet op die van andere modaliteiten. Bij het effect op emissies nemen we daarom alleen het effect op de wegvoertuigkilometers mee; extra emissies die door de *modal shift* ontstaan bij die andere modaliteiten, zoals spoor en binnenvaart, blijven buiten beschouwing. Over het algemeen zorgt een *modal shift* van vrachtwagens naar spoor en binnenvaart voor lagere CO₂-emissies per tonkilometer. Dankzij EU-emissiebeleid is vrachtverkeer over de weg wel bezig met een inhaalslag (Groot, 2007). Een recente studie van CE Delft geeft aan dat tussen nu en 2020 een *modal shift* van weg naar spoor en binnenvaart zorgt voor CO₂-winst, *tenzij* er grote omwegen moeten worden gemaakt of de schaal van het transport klein is: dan is de CO₂-uitstoot per tonkilometer bij wegverkeer, spoor en binnenvaart ongeveer even groot (Den Boer, 2011). De uitstoot van NO_x kan bij vervoer per spoor (dieseltreinen) en binnenvaart zelfs hoger zijn dan bij het vrachtverkeer over de weg, afhankelijk van de omstandigheden.

DVS, 2010) en Scandinavië (Vierth, 2008; OECD/ITF, 2010) zien dat LZV's leiden tot minder verplaatsingen, minder energiegebruik, lagere emissies en lagere kosten. Inschattingen van het effect variëren van 1 procent (Dings, 2000; inclusief reboundeffect) tot maximaal 5 procent (Francke, 2009; IPM&ET, 1996). Ex-ante-onderzoeken in de UK en Duitsland schetsen een minder positief beeld: verwacht wordt dat er een *reverse modal shift* optreedt, dat wil zeggen dat goederen die normaliter per spoor of over water vervoerd worden, nu per LZV worden vervoerd (Knight, 2008). Door deze *reverse modal shift* zou het wegverkeer juist toenemen, en daarmee ook de emissies van het wegverkeer. In deze verkenning zijn we voor de verbeterde benuttingsgraad en LZV's samen uitgegaan van een effect van 0 à 10 procent (gemiddeld 5 procent) minder voertuigkilometers en emissies (eigen analyse KIM).

- **Verkeersveiligheid**
Het effect op verkeersveiligheid is in principe positief, vanwege minder voertuigkilometers en dus minder kans op ongelukken. Bij lange en zwaardere vrachtwagens zou de verkeersveiligheid in het geding kunnen zijn, maar uit bovengenoemde ex-postonderzoeken is naar voren gekomen dat, als gevolg van aanvullende voorwaarden, de verkeersveiligheid in de praktijk niet is verslechterd.
- **Doorstroming**
Het effect op doorstroming is positief, vanwege minder voertuigkilometers bij dezelfde hoeveelheid vervoerde vracht.

Compacte steden/verdichting

Zoals al aangegeven in paragraaf 3.1 is de literatuur niet eenduidig over de potentie van ruimtelijke verdichting c.q. compacte steden. Veel studies geven aan dat oorzaak-gevolgrelaties moeilijk zijn vast te stellen: uit een bepaalde stedelijke structuur vloeit niet perse een bepaald mobiliteitspatroon voort. De inwoners van een stad 'hebben zichzelf geselecteerd' en kiezen voor een bepaalde woonomgeving, dus ook of die wel of niet compact is. Uit empirische data zou blijken dat de hoogte van het huishoudeninkomen een veel betere verklarende factor is voor verplaatsingsgedrag dan de stedelijke structuur (Ruth & Rong, 2006, p.29 e.v.). Hilbers (2009) geeft aan dat het mobiliteitsgedrag maar beperkt te beïnvloeden is door geconcentreerde verstedelijking en dat de hoogte van ov- en parkeertarieven en kilometerbeprijzing veel meer effect hebben. Uit onderzoek van Goudappel Coffeng (2009) blijkt dat stedelijke gebieden in Nederland per inwoner een lagere CO₂-uitstoot voor personenmobiliteit hebben dan landelijke gebieden. Tussen steden met een vergelijkbaar aantal inwoners komen grote verschillen voor, die lijken samen te hangen met de ruimtelijke structuur van de stad en de geboden faciliteiten en functies. Zo produceert een inwoner in Almere bijna twee keer zoveel CO₂ door mobiliteit dan een inwoner van Amsterdam.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- **Emissies/olieafhankelijkheid**
Als potentieel effect van compactere steden op het verminderen van voertuigkilometers en emissies nemen we in deze verkenning 2 à 5 procent. Daarbij hebben we ons vooral gebaseerd op Kampman en Hoën. Kampman zegt dat sommige experts verwachten dat compactere steden de transportgerelateerde emissies met 5 procent kunnen reduceren, ook al hebben de onderzoekers hierover geen uitgeschreven bewijs kunnen vinden

(Kampman, 2009, p.17). Hoen noemt als potentieel effect van compacte steden en tegengaan van spreiding (*urban sprawl*) 2 procent reductie in personenautokilometers (Hoen, 2009, p.28).

- **Verkeersveiligheid**
Als door verdichting van steden minder voertuigkilometers hoeven te worden afgelegd (enerzijds door kortere verplaatsingen en anderzijds door betere mogelijkheden voor andere vervoermiddelen zoals lopen, fietsen en openbaar vervoer), neemt de verkeersveiligheid in principe toe. Een mogelijk negatief effect kan optreden wanneer door verdichting meer verkeer wordt afgewikkeld over (binnenstedelijke) wegen zonder scheiding van vervoersstromen (auto, fiets, bromfiets, voetganger). Reizen in het openbaar vervoer is veiliger dan met andere vervoermiddelen. Maar omdat het reizen per openbaar vervoer meestal een ketenverplaatsing inhoudt, hangt de verkeersveiligheid over de hele route ook af van het voor- en natransport.
- **Doorstroming**
Verdichting leidt tot het hoeven afleggen van minder kilometers waardoor de kans op congestie afneemt en daarmee de doorstroming toeneemt. Ook door meer gebruik van openbaar vervoer zal de doorstroming toenemen.

Hogere kilometerprijs wegverkeer

Bij deze optie worden de kosten per kilometer van het wegverkeer hoger, met als gevolg dat er minder wordt gereden. Hoeveel minder, is afhankelijk van de specifieke prijsverhoging; het effect van een hogere kilometerprijs op de mobiliteit (en daarmee de emissies en de olieafhankelijkheid) is daarom niet eenduidig aan te geven. Ten behoeve van deze verkenning zijn we ervan uitgegaan dat de prijsverhoging van de orde van enkele centen per kilometer is, dezelfde orde van grootte als de kilometerprijsverhoging die was voorzien bij Anders Betalen voor Mobiliteit (de door het kabinet Balkenende IV voorgenomen kilometerheffing). Oftewel, de prijsverhoging per kilometer is niet extreem hoog, maar past binnen de grenzen van 'wat beleid vermag', indien deze kilometerprijsverhoging via overheidsbeleid tot stand zou moeten komen. Dit is overeenkomstig het speelveld dat we in deze verkenning hanteren voor niet-technische opties (zie hoofdstuk 1).

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- **Emissies/olieafhankelijkheid**
De hogere kilometerprijs die het gevolg zou zijn van Anders Betalen voor Mobiliteit, zou de uitstoot van CO₂ en luchtvervuiling in 2020 met naar schatting 5 à 10 procent hebben verminderd (PBL, 2010, p.144). Bij een verhoging van de kilometerprijs met 3,4 cent in de daluren en 14,4 cent in de spitsuren voorziet Hilbers (2009) een afname van het aantal personenvoertuigkilometer met rond 12 procent.²⁷ PBL en ECN noemen 15 procent als bovengrens van de voertuigkilometerreductie die mogelijk is met kilometerbeprijzing, al is niet duidelijk op welke kilometerprijs dit is gebaseerd (Hoen, 2009, p.28). De veranderingen in mobiliteit zijn het

²⁷ Hilbers geeft geen effect op het totale aantal voertuigkilometers, maar wel op het aantal voertuigkilometers in de spits- en daluren: bij een vlakke kilometerheffing van 3,4 ct/km is de afname in de spits 7 procent en in de daluren 11 procent (in 2020). Deze daling komt geheel voor rekening van het personenverkeer; het vrachtverkeer blijft in voertuigkilometers gelijk. Wanneer de vlakke heffing wordt gecombineerd met een congestieheffing van 11 ct/km neemt het aantal voertuigkilometers in de spits met nog eens 5 procent af, doordat personenauto's minder rijden; het aantal voertuigkilometers in de daluren blijft gelijk.

grootst bij het sociaal-recreatief verkeer en het woon-werkverkeer; de veranderingen bij het vrachtverkeer en het zakelijk verkeer zijn kleiner (Hilbers, 2007; Verhoef, 2004). Al met al schatten we in dat het aantal gereden voertuigkilometers via een hogere kilometerprijs (bij een gemiddeld beleidsscenario) met 5 à 15 procent is te verminderen.

- Verkeersveiligheid
De verkeersveiligheid neemt door een hogere kilometerprijs naar verwachting toe, vanwege de afname van het aantal voertuigkilometers (o.a. Schermers, 2009).
- Doorstroming
Ervaringen (met prijsbeleid) in andere landen laten zien dat een hogere kilometerprijs de congestie vaak effectief bestrijdt (Verhoef, 2004). Ook Hilbers gaat uit van een positief effect op de doorstroming (Hilbers, 2007).

4.3 Optelsom

Omdat ze elkaar gedeeltelijk overlappen, kan het potentiële effect van de opties niet bij elkaar worden opgeteld. Dat zou leiden tot dubbeltelling. Overlap bestaat vooral tussen de optie 'hogere kilometerprijs wegverkeer' aan de ene kant en de overige opties aan de andere kant. Zo zal een hogere kilometerprijs bij het wegverkeer deels kunnen leiden tot een *modal shift*, omdat wegverkeer relatief duurder wordt ten opzichte van andere modaliteiten. Een hogere kilometerprijs heeft ook een overlap met 'compacte steden': een hogere kilometerprijs zorgt er bijvoorbeeld voor dat werknemers eerder een woonplek in de buurt van hun werk en vice versa kiezen en ook bedrijven hebben een prikkel om tegen lagere reiskosten (reisafstand) bereikbaar te zijn voor hun werknemers. Dit bevordert een stedelijke concentratie. Daartegenover worden thuis- en plaatsonafhankelijk werken, elektronisch vergaderen en elektronisch winkelen (gefaciliteerd door ICT) niet of minder gedreven vanuit een prikkel om reiskosten te besparen, maar meer uit gemak en besparing op werkplekken voor werkgevers.

Om het totale potentieel binnen deze oplossingsrichting te bepalen, is een correctie nodig voor dubbeltelling. In de literatuur is weinig informatie te vinden over correctiefactoren. We hebben daarom zelf een inschatting gemaakt. Voor thuis- en plaatsonafhankelijk zijn we uitgegaan van een dubbeltelling van 30 procent, voor *modal shift*, verbeterde logistiek en compacte steden van een dubbeltelling van 80 procent ten opzichte van 'hogere kilometerprijs wegverkeer'²⁸; voor de overige opties zijn we ervan uitgegaan dat er geen sprake is van dubbeltelling. Als we deze correctie toepassen, levert dat een totaal reductiepotentieel van 5 à 20 procent voor vrachtwagenkilometers en 10 à 25 procent voor personenautokilometers op. Voor de twee categorieën samen komen we grofweg uit op een reductie van 10 à 20 procent.²⁹

²⁸ Indien een maatregel bijvoorbeeld voor 80 procent dubbeltelt, tellen we het effect van de betreffende maatregel in de optelsom nog maar voor 20 procent (100 procent-80 procent) mee.

²⁹ Dit komt goed overeen met de inschatting van PBL dat maatregelen die de mobiliteit beperken en *modal shift* samen een potentie van 15 procent hebben (PBL, 2009, p.77).

5 Effect van oplossingsrichting VOERTUIG

- *Voertuigen met een traditionele interne verbrandingsmotor (ICE) kunnen in 2050 ten opzichte van de referentiesituatie enkele tientallen procenten energiezuiniger worden door toepassing van een zuinige motor, hybride-technologie, lichtgewichtconstructies en dergelijke. Bij personenauto's is het potentieel groter dan bij vrachtauto's.*
- *Met een emissieoptimale snelheid op de weg en slimme voertuigen (ITS) is het energiegebruik per kilometer nog iets verder (circa 10 procent) te verlagen; de emissies en olieafhankelijkheid nemen evenredig af.*
- *Bij personenauto's kan de elektromotor als alternatief aandrijfsysteem (toegepast in elektrische en brandstofcelvoertuigen) een nog grotere winst opleveren; voor vrachtauto's is dit geen serieuze optie (met uitzondering van kortereafstandstransport).*
- *Deze oplossingsrichting heeft een neutraal tot positief effect op doorstroming en verkeersveiligheid.*

Dit hoofdstuk gaat over het potentiële effect van opties binnen de oplossingsrichting VOERTUIG op emissies en olieafhankelijkheid van het wegvervoerssysteem, doorstroming en verkeersveiligheid. Het gaat om de effecten die optreden binnen het speelveld dat in figuur 1.1 is aangegeven. Oftewel: de effecten die technisch gezien mogelijk zijn, onafhankelijk van het gevoerde beleid om de opties te realiseren.

5.1 Overzicht van effecten

In tabel 5.1 geven we een overzicht van de positieve en negatieve effecten van de opties van oplossingsrichting VOERTUIG op emissies, olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming. De scores zijn afgezet tegen de referentiesituatie, te weten de situatie met een voortzetting van het huidige beleid. De onderbouwing van de scores staat in paragraaf 5.2.

Zoals blijkt uit tabel 5.1 hebben alle opties van oplossingsrichting VOERTUIG een positief effect op de emissies en olieafhankelijkheid; dit is logisch, omdat reductie van emissies/olieafhankelijkheid een belangrijk criterium was voor het selecteren van de opties. De opties 'emissieoptimale snelheid' en 'slim voertuig (ITS)' scoren daarnaast ook positief op verkeersveiligheid en doorstroming van het wegverkeer, vanwege het feit dat deze opties aangrijpen op het rijgedrag (rijnsnelheid en gelijkmatig rijden). Slimme voertuigen worden bovendien vaak ontwikkeld met verkeersveiligheid en doorstroming als hoofddoel.

Het effect in de praktijk zal worden beïnvloed door het al dan niet toepassen van flankerende maatregelen om negatieve effecten op te vangen (bijvoorbeeld het toepassen van kunstmatig geluid bij voertuigen met een elektromotor, die bij lage rijnsnelheden vrijwel onhoorbaar zijn voor voetgangers en fietsers).

Tabel 5.1

Kwalitatief effect van onderzochte opties van oplossingsrichting VOERTUIG

	Emissies/ olieafhankelijkheid	Verkeersveiligheid	Doorstroming
Zuinig ICE-voertuig	+	0 ^{*)}	0
Emissieoptimale snelheid	+	+	+
Slim voertuig (ITS)	+	+	+
Alternatieve aandrijfsystemen: elektrisch voertuig en brandstofcelvoertuig	+	0 ^{**)}	0

+ = beter dan referentiesituatie; 0 = gelijk aan referentiesituatie; - = slechter dan referentiesituatie

*) Als deze optie wordt ingevuld met een lichtgewicht voertuig kan er sprake zijn van een '+/-' score ('-' voor de inzittenden van het voertuig, '+' voor de overige weggebruikers), tenzij alle wegvoertuigen lichter worden.

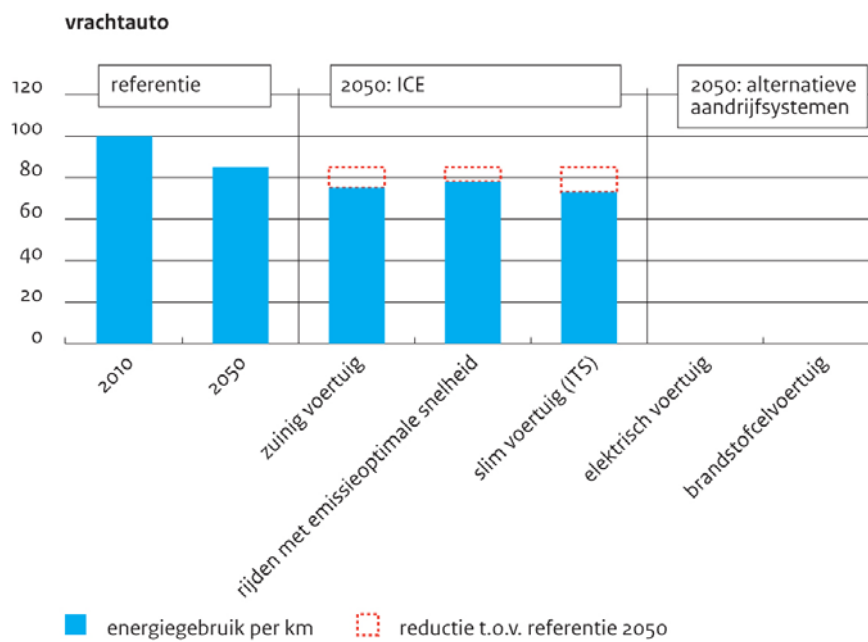
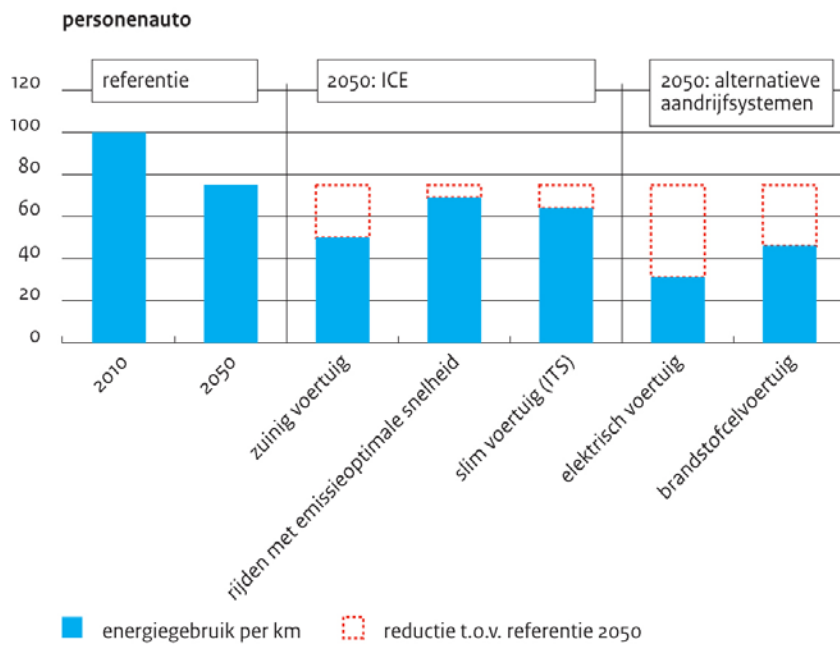
***) Eventueel kan er een '-' optreden bij zeer lage rijksnelheden (minder dan 30 km per uur) binnen de bebouwde kom, omdat een elektromotor zeer stil is en daardoor slecht hoorbaar voor voetgangers en fietsers.

Het kwantitatieve effect van de verschillende opties van de oplossingsrichting VOERTUIG is weergegeven in figuur 5.1. Het gaat om een orde-grootte van energiegebruik per kilometer in 2050 ten opzichte van de referentiesituatie. In de referentiesituatie is ervan uitgegaan dat ICE-voertuigen op benzine/diesel in 2050 circa 25 procent (personenauto's) respectievelijk 15 procent (vrachtauto's) zuiniger zijn dan in 2010 (zie voor een toelichting bijlage A).

Zoals te zien is in de figuur, hebben bij personenauto's alternatieve aandrijfsystemen de grootste potentie voor vermindering van het energiegebruik. Bij vrachtauto's is deze optie niet beschikbaar. Maar ook bij de conventionele ICE-voertuigen is nog een flinke efficiencywinst te boeken via bijvoorbeeld lichtgewichtconstructies, aerodynamica en hybridisering (deze vallen onder de optie 'zuinig ICE-voertuig'). Het potentieel hiervan is bij personenauto's groter dan bij vrachtauto's (orde-grootte 30 procent versus 10 procent ten opzichte van de referentiesituatie). Ook het rijden met een emissieoptimale snelheid en toepassing van ITS heeft een substantieel effect. Bij beide opties ontstaat het effect door een aanpassing in de voertuigsnelheid.

Figuur 5.1

Kwantitatief effect (ordegrootte; 2010=100) op energiegebruik per voertuigkilometer van onderzochte opties van oplossingsrichting VOERTUIG, afgezet tegen de referentiesituatie
Bron: E4tech, 2007; Otten, 2009; eigen analyse KIM



5.2 Effect op emissies, verkeersveiligheid en doorstroming per optie

In deze paragraaf gaan we voor elk van de opties van oplossingsrichting VOERTUIG in op het specifieke effect op de emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming.

Zuinig ICE-voertuig

Een voertuig met traditionele interne verbrandingsmotor (ICE) is zuiniger te maken door toepassing van een zuinige motor en hybride-technologie en door het voertuig kleiner, lichter en aerodynamischer te maken. Het technisch potentieel verschilt voor personen- en vrachtauto's. Bij vrachtauto's is een groot deel van het technisch potentieel al gerealiseerd vanuit bedrijfseconomische belangen.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- **Emissies/olieafhankelijkheid**
Bij personenauto's met ICE is technisch een brandstofbesparing van zo'n 50 procent (inclusief hybridisering) haalbaar ten opzichte van de huidige situatie. Daarmee is echter de grens van wat technisch mogelijk is wel zo ongeveer bereikt (Hoen, 2009, p.26). De reductie in de uitstoot van CO₂, NO_x en PM₁₀ gaat gelijk op met de brandstofbesparing. Bij vrachtauto's met ICE is ten opzichte van de huidige situatie technisch een brandstofbesparing van 15-30 procent mogelijk, vooral door hybridisering. Met name voor langeafstandsvrachtverkeer zal dit potentieel moeilijk te realiseren zijn, omdat hybride technologie niet erg effectief is bij voertuigen die met constante snelheid en vermogen rijden (PBL, 2009). Ten opzichte van de referentiesituatie is de besparing minder groot dan de bovengenoemde percentages, aangezien in de referentiesituatie ook al een efficiencyverbetering optreedt van circa 15 procent respectievelijk 25 procent voor vracht- en personenauto's, als gevolg van vastgesteld beleid met emissienormen. Zie voor een toelichting bijlage A.
- **Verkeersveiligheid**
Als de efficiencywinst wordt behaald door een kleiner, lichter voertuig kan er een veiligheidseffect optreden. Voor de inzittenden zijn lichtere auto's in het algemeen onveiligere dan zwaardere. Bij een botsing tegen een zwaardere auto is de afloop voor de lichtste partij het slechtst (Van Kampen, 2000). Bij botsingen tegen vaste obstakels zoals een boom, maakt een licht of zwaar voertuig voor de inzittenden overigens niet uit. Voor kwetsbare verkeersdeelnemers zoals wandelaars en fietsers zorgen lichtere auto's juist voor een grotere verkeersveiligheid. Het veiligheidseffect is dus niet eenduidig.
- **Doorstroming**
Zuinige voertuigen scoren neutraal op het gebied van doorstroming, want de drukte op de weg verandert hierdoor niet.

Emissieoptimale snelheid

Er is met deze optie vooral winst te boeken op snelwegen, waar de snelheid ver afdalt van de emissieoptimale snelheid van rond 40-100 km/u. Ook op drukke wegen, waar auto's veel op elkaar moeten anticiperen (remmen/accelereren), is er een positief effect wanneer deze optie ertoe leidt dat er gelijkmatiger wordt gereden (Den Boer, 2004).

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- Emissies/olieafhankelijkheid
Bij een verlaging van de maximumsnelheid op snelwegen naar 80 km/u wordt een vermindering van de totale CO₂-uitstoot van personenauto's van ongeveer 7 procent verwacht. Daarnaast wordt ingeschat dat op de langere termijn de CO₂-reductie zelfs kan toenemen tot 12 procent, door het indirecte effect dat de lagere snelheid leidt tot kortere verplaatsingen (Otten, 2009). De effecten op NO_x en PM₁₀ zijn vergelijkbaar.
- Verkeersveiligheid
Een lagere gemiddelde voertuigsnelheid heeft een positief effect op de verkeersveiligheid.
- Doorstroming
Een lagere gemiddelde voertuigsnelheid heeft een positief effect op de doorstroming. De toegenomen verkeersveiligheid (zie hierboven) leidt bovendien nog tot een klein extra effect. Op het hoofdwegennet ontstaat namelijk 25 procent van de files door ongevallen.

Slim voertuig (ITS)

Hoewel slimme voertuigen vooral met het oog op verkeersveiligheid en doorstroming worden ontwikkeld, en niet vanwege brandstofbesparing/emissies, hebben ze op dit laatste wel effect omdat ze werken via de rijnsnelheid en de acceleratie/deceleratie van het voertuig. Het grootste effect op de emissies treedt op bij de ITS-systemen die op het hoofdwegennet werken, omdat het daar gaat om relatief lange verplaatsingen. Het effect is vergelijkbaar met dat van 'emissieoptimale snelheid'. De ITS-systemen die op het onderliggend wegennet werkzaam zijn, sorteren vooral effect ter hoogte van kruispunten. Zie voor een overzicht van ITS-systemen paragraaf 3.2.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- Emissies/olieafhankelijkheid
Systemen hoofdwegennet: Automatische cruisecontrol (ACC) zou bij brede toepassing in het wagenpark op het hoofdwegennet 10 tot 20 procent brandstofgebruik kunnen schelen door een stabielere verkeersstroom (Ammerlaan, 2003). Van C-ACC, een geavanceerde versie van ACC met communicatie tussen voertuigen, zijn nog geen praktijkgegevens bekend omdat het nog niet op de markt is. Waarschijnlijk zal dit tot minstens evenveel brandstofreductie leiden als ACC. De potentiële emissiereductie van *platooning* ligt in de orde van 20 procent op het hoofdwegennet (Baker, 2010). Gemeten over het wegverkeer op het hoofdwegennet en het onderliggend wegennet samen liggen de reductiepercentages een factor twee lager³⁰: ACC, Stop & Go en C-ACC leveren 5 à 10 procent reductie van emissies op, *platooning* 10 procent.
Systemen onderliggend wegennet: ICA en CICAS ondersteunen bij ongeregelde kruispunten. Het effect ervan op het rijgedrag is echter breder merkbaar, met name in stedelijk gebied. Een automobilist hoeft niet op voorhand voor een kruising sterk af te remmen, omdat het systeem hem waarschuwt voor kruisend verkeer. De inschatting is dat bij volledige penetratie het effect van ICA en CICAS op de emissies van het wegverkeer

³⁰ We zijn uitgegaan van een fifty-fiftyverdeling tussen voertuigkilometers op het hoofdwegennet en het onderliggende wegennet.

- ongeveer 2 à 4 procent zal zijn (eigen analyse KIM).
- **Verkeersveiligheid**
Systemen hoofdwegennet: Het verkeersveiligheidseffect bij volledige penetratie van ACC wordt geschat op 3 procent minder doden en 13 procent minder ziekenhuisgewonden (Wilmink, 2008). Voor de andere systemen zullen de effecten vergelijkbaar zijn. In Ammerlaan (2003) wordt een afname van het aantal kop-staart-botsingen van 20-30 procent genoemd. Systemen onderliggend wegennet: Bij de systemen voor het onderliggend wegennet – ICA en CICAS – is de verkeersveiligheid het hoofddoel. Omdat de systemen nog niet op de markt zijn, zijn nog geen praktijkgegevens bekend.
- **Doorstroming**
Systemen hoofdwegennet: De systemen die geschikt zijn voor het hoofdwegennet kunnen - bij een hoge penetratiegraad en een korte ingestelde volgafstand tussen de voertuigen – de wegcapaciteit vergroten en zorgen voor een stabielere verkeersstroom. Als gevolg hiervan kunnen meer en langere verplaatsingen en een verschuiving van openbaar vervoer en fiets naar de auto plaatsvinden (*rebound*-effect). Dit negatieve indirecte effect zal echter aanzienlijk kleiner zijn dan het positieve directe effect. Het verwachte effect is 10 procent minder voertuigverliesuren (Ammerlaan, 2003). Als *platooning* ook werkt bij discontinuïteiten (in-/uitvoegstroken), kan daarmee zelfs een groter effect op de doorstroming worden bereikt. Discontinuïteiten vormen de belangrijkste *bottlenecks* op het hoofdwegennet. Door de toegenomen verkeersveiligheid (zie hierboven) kan nog een extra positief effect optreden, omdat veel files ontstaan als gevolg van ongevallen.
Systemen onderliggend wegennet: De systemen voor het onderliggend wegennet hebben naar verwachting geen effect op de doorstroming (eigen analyse KIM).

Alternatieve aandrijfsystemen: elektrisch en brandstofcelvoertuig

Elektrische en brandstofcelvoertuigen gebruiken een elektromotor die van zichzelf een hogere efficiency heeft dan een ICE-voertuig.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming:

- **Emissies/olieafhankelijkheid**
Bij vergelijkbare voertuigen en rijomstandigheden gebruikt een dieselvoertuig op dit moment per gereden kilometer ongeveer drie keer zoveel energie als een elektrisch voertuig en ongeveer twee keer zoveel als een brandstofcelvoertuig (E4tech, 2007, baseert zich op de *Well-to-Wheel*-studie van EUCAR/JRC/CONCAWE). Het effect van de alternatieve aandrijfsystemen op de emissies en de olieafhankelijkheid is niet eenduidig te geven, dit hangt af van de gebruikte energiebronnen.
- **Verkeersveiligheid**
Elektrische en brandstofcelauto's zijn bij lagere rijnsnelheden (minder dan 30 km/uur) stiller dan auto's met een ICE-motor. Bij hogere rijnsnelheden is het bandengeluid dominant (Jabben, 2010). Ze kunnen binnen de bebouwde kom leiden tot een risico voor de verkeersveiligheid, omdat kwetsbare andere verkeersdeelnemers ze niet horen aankomen. Dit is op te lossen met artificieel geluid.
In het geval van een verkeersongeluk waarbij slachtoffers uit hun voertuig bevrijd moeten worden, moeten de hulpdiensten goed kunnen omgaan met

de elektrische circuits en de waterstoftanks van het voertuig (net als nu al met airbags). Bij sommige auto's wordt nu al automatisch geregeld dat het elektrisch circuit in het geval van een ongeluk onderbroken wordt. Te verwachten is dat dit in 2050 geen probleem meer zal zijn.

- Doorstroming
Elektrische en brandstofcelvoertuigen scoren neutraal op het gebied van doorstroming, want de drukte op de weg verandert hierdoor niet.

6 Effect van oplossingsrichting ENERGIE

- *De potentie van deze oplossingsrichting voor het verminderen van emissies en olieafhankelijkheid is zeer groot, tot zelfs 100 procent bij gebruik van energie die emissieloos is opgewekt, zoals zonne- en windenergie, dan wel gebruik van andere energiebronnen dan olie.*
- *Inzet van biobrandstof verlaagt wel de CO₂-uitstoot, maar niet de uitstoot van NO_x en PM₁₀.*
- *De emissiereductie door toepassing van elektriciteit en waterstof (in elektrische en brandstofcelvoertuigen) hangt af van de wijze waarop ze zijn geproduceerd.*
- *Elektriciteit uit het referentie-elektricitetspark en waterstof uit de in de industrie gebruikelijke aardgasreformingmethode (SMR) hebben per eenheid energie een hogere CO₂-uitstoot dan diesel en benzine; omdat de elektromotor waarin elektriciteit en waterstof worden toegepast veel energiezuiniger is dan een verbrandingsmotor zijn de emissies per gereden kilometer wel lager dan bij diesel/benzine.*
- *Ten opzichte van elektriciteit uit het referentiepark is een sterke emissiereductie mogelijk met elektriciteit geproduceerd uit bijvoorbeeld wind, zon en kernenergie.*
- *Ten opzichte van waterstof uit SMR is een sterke emissiereductie mogelijk met waterstof die via elektrolyse wordt gemaakt uit hernieuwbare elektriciteit of bij toepassing van CCS.*
- *Deze oplossingsrichting heeft geen effect op doorstroming en verkeersveiligheid.*

Dit hoofdstuk gaat over het potentiële effect van de opties binnen oplossingsrichting ENERGIE op emissies en olieafhankelijkheid van het wegvervoerssysteem, doorstroming en verkeersveiligheid. Het gaat om de effecten die optreden binnen het speelveld dat in figuur 1.1 is aangegeven. Oftewel: de effecten die technisch gezien mogelijk zijn, onafhankelijk van het gevoerde beleid om de opties te realiseren.

6.1 Overzicht van effecten

In tabel 6.1 geven we een overzicht van de positieve en negatieve effecten van de opties van de oplossingsrichting ENERGIE op emissies, olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming. De scores zijn afgezet tegen de referentiesituatie, te weten de situatie met een voortzetting van het huidige beleid. De onderbouwing van de scores staat in paragraaf 6.2.

Zoals blijkt uit tabel 6.1 hebben bijna alle opties van de oplossingsrichting ENERGIE een positief effect op de emissies en olieafhankelijkheid; dit is ook logisch, omdat reductie van emissies/olieafhankelijkheid een belangrijk criterium was voor het selecteren van opties. Alleen bij de optie biobrandstof is het effect gemengd: het effect op CO₂ en olieafhankelijkheid is positief, op NO_x en PM₁₀ neutraal. Bij deze oplossingsrichting vindt de vermindering van emissies en olieafhankelijkheid plaats door alternatieve energiedragers. Deze hebben geen effect op de doorstroming van het verkeer en de verkeersveiligheid.

Tabel 6.1

Kwalitatief effect van onderzochte opties van oplossingsrichting ENERGIE

	Emissies/ Olieafhankelijkheid	Verkeers- veiligheid	Doorstroming
Biobrandstof	CO ₂ : + olieafhankelijkheid: + NO _x , PM ₁₀ : 0	n.v.t.	n.v.t.
Emissiearme elektriciteit	+	n.v.t.	n.v.t.
Emissiearme waterstof	+	n.v.t.	n.v.t.

+ = beter dan referentiesituatie; 0 = gelijk aan referentiesituatie; - = slechter dan referentiesituatie

Het kwantitatieve effect van de drie opties van oplossingsrichting ENERGIE is te vinden in figuur 6.1. Er kan geen eenduidig effect worden aangegeven, omdat de emissies afhangen van de productiewijze en de mate waarin gebruik wordt gemaakt van CO₂-arme bronnen en/of CO₂-opslag (CCS). In plaats daarvan hebben we bij elk van de drie opties – biobrandstof, emissiearme elektriciteit, emissiearme waterstof – een aantal verschillende varianten uitgewerkt. Dit is niet uitputtend, maar bedoeld om een beeld te geven van de range aan mogelijke effecten op de emissies. De varianten die in figuur 6.1 worden onderscheiden zijn:

- Bij biobrandstof: verschillende percentages (50, 85, 100 procent) bijmenging bij benzine/diesel.
- Bij elektriciteit: elektriciteit uit het referentie-elektriciteitspark³¹ en twee 'mixin' van elektriciteit uit fossiele bron en elektriciteit uit CO₂-loze bron.³²
- Bij waterstof: productie van waterstof uit aardgas via het SMR-procédé³³, al dan niet in combinatie met CO₂-opslag (CCS), en productie van waterstof uit deels elektrolyse, deels SMR.

Overigens zijn deze varianten niet volledig willekeurig gekozen, maar zijn ze belangrijk voor de combinatie van verschillende oplossingsrichtingen. Dit wordt uitgewerkt in hoofdstuk 8.

Weergegeven is de orde grootte van CO₂-uitstoot per eenheid energie (megajoule, MJ) in 2050 ten opzichte van de referentiesituatie. In de referentiesituatie in 2050 is uitgegaan van benzine/diesel in combinatie met 6 procent CO₂-loze brandstof, conform de Europese richtlijn voor brandstofkwaliteit. De reductie van de NO_x- en PM₁₀-uitstoot (ten opzichte van de referentiesituatie) gaat gelijk op met die van CO₂, behalve in het geval van toepassing van biobrandstof: dat levert wel een CO₂-reductie op, maar vaak geen reductie van NO_x en PM₁₀.

Alle varianten zorgen voor afname van de olieafhankelijkheid ten opzichte van de referentiesituatie. Bij waterstof en elektriciteit is de olieafhankelijkheid nul, bij toepassing van biobrandstof hangt de olieafhankelijkheid af van de mate waarin de biobrandstof wordt bijgemengd bij benzine/diesel.

In de figuur valt te zien dat elektriciteit uit het referentie-elektriciteitspark ('elektriciteit referentie') en waterstof die via SMR uit aardgas is gemaakt, een

³¹ Dit bestaat uit een mix van kolen-/gas-/kerncentrales en hernieuwbare bronnen. Zie bijlage A voor meer informatie.

³² Mix 1: 60 procent fossiel en 40 procent CO₂-loos; mix 2: 30 procent fossiel en 70 procent CO₂-loos.

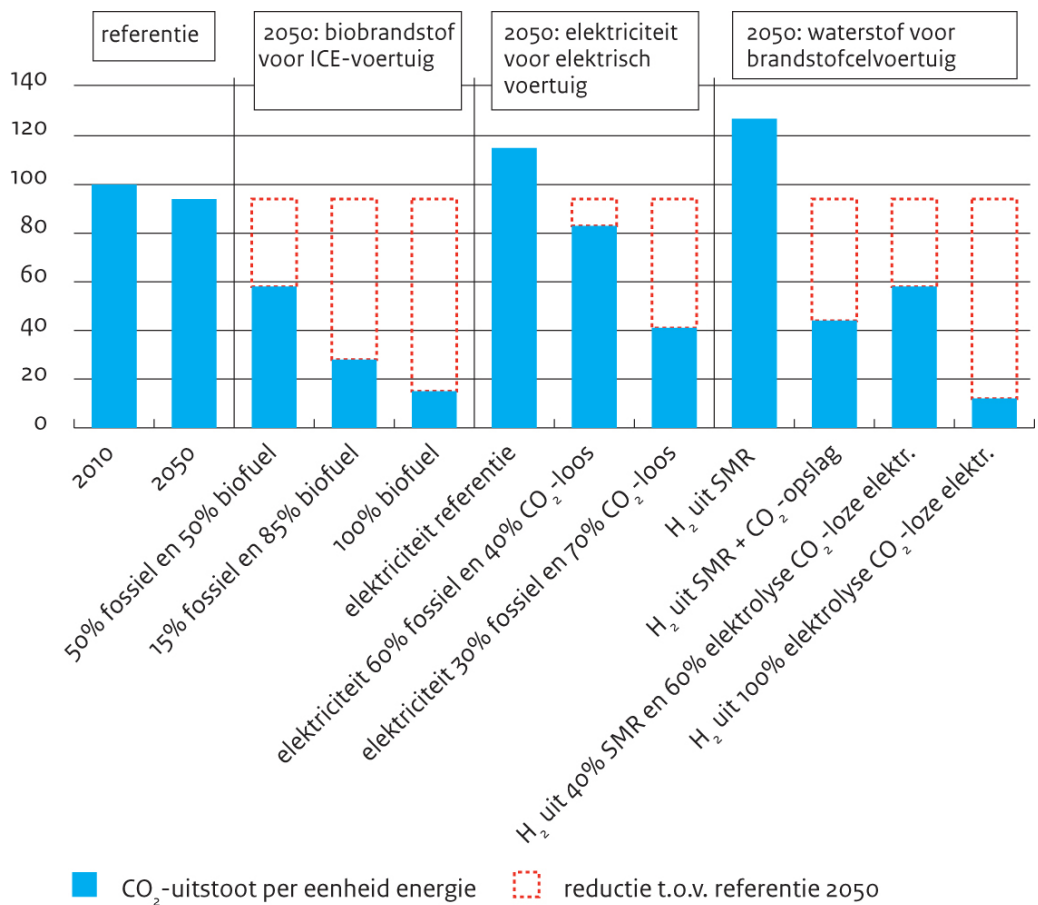
³³ SMR is *Steam Methane Reforming*, ook wel aardgasreforming genoemd. Dit is momenteel de meest gebruikte methode voor productie van waterstof.

hogere CO₂-uitstoot per eenheid energie hebben dan de benzine/diesel in de referentiesituatie. Omdat elektriciteit en waterstof worden toegepast in een elektromotor, die veel energiezuiniger is dan een verbrandingsmotor, is de CO₂-uitstoot per gereden kilometer van deze twee opties wel lager dan van de combinatie benzine/diesel in een ICE-voertuig. (Dit is niet afgebeeld.)

Bij varianten van elektriciteit en waterstof die (deels) uit hernieuwbare bronnen worden gemaakt of die worden gecombineerd met CO₂-opslag, neemt de CO₂-uitstoot per eenheid energie af, zowel ten opzichte van elektriciteit en waterstof die op de 'standaardwijze' worden gemaakt, als ten opzichte van diesel/benzine. Het verschil in CO₂-uitstoot per gereden kilometer is ten opzichte van diesel/benzine zelfs nog groter, gezien het lagere rendement van de verbrandingsmotor ten opzichte van de elektromotor (de CO₂-uitstoot per km is niet afgebeeld).

Figuur 6.1

Kwantitatief effect (ordegrootte; 2010=100) op de (CO₂-)uitstoot per eenheid energie van onderzochte opties van oplossingsrichting ENERGIE, afgezet tegen de referentiesituatie
 Bron: EUCAR/JRC/CONCAWE, 2007; EUCAR/JRC/CONCAWE, 2008; E4tech, 2007; Skinner, 2010; eigen analyse KIM
 N.B. De uitstoot van NO_x en PM₁₀ gaat, ten opzichte van de referentiesituatie in 2050, gelijk op met de CO₂-uitstoot, uitgezonderd bij de optie biobrandstof



6.2 Effect op emissies, verkeersveiligheid en doorstroming per optie

In deze paragraaf gaan we voor elk van de opties van de oplossingsrichting ENERGIE in op het specifieke effect op emissies/olieafhankelijkheid. De opties hebben geen effect op verkeersveiligheid en doorstroming, zodat we dit niet apart behandelen.

Biobrandstof

De lijst met potentiële biobrandstoffen is groot en de mate van CO₂-reductie kan sterk variëren, afhankelijk van de gebruikte biomassa en het productieproces. In het kader van deze *quick scan* verkenning hebben we ons gericht op biobrandstoffen met een groot potentieel voor CO₂-reductie, voornamelijk tweede generatie biobrandstoffen.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid:

- In de studie 'Routes to 2050' voor de Europese Commissie (Hill, 2010, p.53) is ervan uitgegaan dat de in 2050 beschikbare biobrandstof niet voor 100% van de tweede generatie zal zijn, maar dat ook de eerste generatie nog een beperkt marktaandeel heeft; daarom is gerekend met een CO₂-reductie die oploopt van 60 procent in 2020 tot 85 procent in 2050.³⁴ In lijn met Hill (2010) zijn we in deze verkenning uitgegaan van 85 procent CO₂-reductie door biobrandstof in 2050. Verder hebben we gerekend met een aantal verschillende percentages waarin deze biobrandstof wordt bijgemengd bij conventionele diesel/benzine (zie figuur 6.1). Dit is overeenkomstig de huidige praktijk, waarin biobrandstof ook wordt bijgemengd. Op NO_x en PM₁₀ heeft toepassing van biobrandstof geen of nauwelijks effect³⁵ (Verbeek, 2008).

Emissiearme elektriciteit

Het gaat hier om de elektriciteit die wordt toegepast in elektrische voertuigen.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid:

- De CO₂-uitstoot bij de productie van elektriciteit is afhankelijk van de energiebron en het productieproces. Dit kan dus sterk variëren. In de kwantitatieve analyses in deze verkenning zijn we uitgegaan van drie verschillende varianten, om een zo breed mogelijk beeld te krijgen van het effect op de emissies (zie figuur 6.1):
 1. Elektriciteit uit het referentie-elektriciteitspark.
 2. Elektriciteit die voor 60 procent uit fossiele oorsprong komt en voor 40 procent uit CO₂-loze bron. Dit laatste kan zowel duurzame energie (bijvoorbeeld wind en zon) als kernenergie zijn. De CO₂-uitstoot per kilowattuur bedraagt circa 240 gram.³⁶

³⁴ Ter vergelijking: de geavanceerde tweede generatiebiobrandstof 'FT-diesel uit biomassa' is voor 93 à 96 procent CO₂-loos, afhankelijk van de specifieke houtachtige biomassa die is gebruikt (EUCAR/JRC/CONCAWE, 2008); beschouwde biomassastromen zijn: houtafval, geteeld hout en 'black liquor', het residu dat overblijft bij de productie van papierpulp uit hout in een papierfabriek. Ook bio-DME haalt vergelijkbare hoge reductiepercentages (bij inzet van dezelfde biomassastromen).

³⁵ Dat wil zeggen: bij voertuigen die voldoen aan Euro 6/VI, de Euronorm die in 2014 ingaat voor nieuwe personen- respectievelijk vrachtauto's.

³⁶ Zie bijlage A.

3. Elektriciteit die voor 30 procent uit fossiele oorsprong komt en voor 70 procent uit CO₂-loze bron. De CO₂-uitstoot per kilowattuur bedraagt circa 120 gram.

Emissiearme waterstof

Het gaat hier om de waterstof die wordt toegepast in brandstofcelvoertuigen.

Effect op emissies/olieafhankelijkheid:

- De CO₂-uitstoot bij de productie van waterstof is afhankelijk van de bron en het productieproces. Dit kan dus sterk variëren. In de kwantitatieve analyses in deze verkenning hebben we een aantal verschillende vormen van waterstofproductie onderscheiden:
 1. Productie uit aardgas via aardgasreforming (SMR). Dit levert een CO₂-uitstoot van circa 100 g/MJ op (EUCAR/JRC/CONCAWE, 2008). Dit is de methode die ook in de studie van Hanschke is gehanteerd (Hanschke, 2009).
 2. Productie uit SMR in combinatie met CO₂-opslag. De CO₂-uitstoot is dan circa 40 g/MJ (EUCAR/JRC/CONCAWE, 2008).
 3. Productie van waterstof uit elektrolyse van hernieuwbare elektriciteit (bijvoorbeeld uit een windturbine). Dan is de CO₂-uitstoot over de hele productieketen nog maar 10 g/MJ (EUCAR/JRC/CONCAWE, 2008).

In de kwantitatieve analyse hebben we 1, 2 en 3 en een mengvorm van 1 en 3 toegepast. Zie figuur 6.1.

7 Effect van oplossingsrichting FILTER

- *Deze oplossingsrichting levert de mogelijkheid om de emissies van NO_x en PM₁₀ sterk te verminderen. De opties die we in de literatuur hebben gevonden, worden bij het huidige beleid ook al ingezet, zodat de additionele emissiereductie gering is.*
- *Deze oplossingsrichting heeft geen effect op de doorstroming en de verkeersveiligheid.*

Dit hoofdstuk gaat over het potentiële effect van de oplossingsrichting FILTER op emissies en olieafhankelijkheid van het wegvervoerssysteem, doorstroming en verkeersveiligheid. Het aangrijpingspunt bij deze oplossingsrichting is de *end-of-pipe* filtering van uitlaatgassen.

7.1 Overzicht van effecten

In tabel 7.1 staat een overzicht van de positieve en negatieve effecten van de opties van oplossingsrichting FILTER op emissies, olieafhankelijkheid, verkeersveiligheid en doorstroming. De scores zijn afgezet tegen de referentiesituatie. De onderbouwing staat in paragraaf 7.2.

De onderscheiden opties van oplossingsrichting FILTER hebben geen of een zeer gering³⁷ effect op de CO₂-uitstoot en geen effect op de doorstroming van het verkeer en de verkeersveiligheid. Op de emissies van PM₁₀ en NO_x is het effect van de onderscheiden opties positief, maar slechts klein ten opzichte van de referentiesituatie, omdat ze daarin ook al vaak worden toegepast om aan de Euronormen te kunnen voldoen. We hebben in de literatuur geen andere opties gevonden die wel een groot additioneel effect hebben.

Tabel 7.1
Kwalitatief effect van onderzochte opties van oplossingsrichting FILTER

	Emissies/olie-afhankelijkheid	Verkeersveiligheid	Doorstroming
Roetfilter	CO ₂ : 0 NO _x : 0 PM ₁₀ : 0/+	n.v.t.	n.v.t.
SCR	CO ₂ : 0 NO _x : 0/+ PM ₁₀ : 0	n.v.t.	n.v.t.
EGR	CO ₂ : 0 NO _x : 0/+ PM ₁₀ : 0	n.v.t.	n.v.t.

+ = beter dan referentiesituatie; 0 = gelijk aan referentiesituatie; - = slechter dan referentiesituatie

³⁷ Van de orde van tienden van procenten (Visser, 2008).

7.2 Effect op emissies, doorstroming en verkeersveiligheid per optie

In deze paragraaf gaan we voor elk van de opties van de oplossingsrichting FILTER in op het specifieke effect op de emissies/olieafhankelijkheid.

Roetfilter

Het effect op emissies/olieafhankelijkheid:

- Met een roetfilter kan in principe 99 procent van de PM₁₀ uit de uitlaatgassen gefilterd worden (Bovag). Voor het halen van de Euro-5-normen voor personenauto's (per september 2009) worden nieuwe dieservoertuigen al standaard van roetfilters voorzien. In 2050 zullen in de referentiesituatie roetfilters naar verwachting al volledig worden toegepast.

SCR

Het effect op emissies/olieafhankelijkheid:

- Met SCR kan de NO_x-uitstoot met 80 à 90 procent worden verminderd (Bovag; Wikipedia³⁸). Met de huidige meest geavanceerde versies van SCR kunnen vrachtwagens aan de Euro-V-norm voldoen, die in 2008 is ingegaan (TNO, 2005).

EGR

Het effect op emissies/olieafhankelijkheid:

- Met EGR kan de NO_x-uitstoot met circa 70 procent worden verminderd (Krishnan, 2006). Dit is een techniek die nu doorbreekt om vrachtwagens aan de nieuwe aangescherpte Euronormen te laten voldoen (TNO, 2005).

³⁸ http://nl.wikipedia.org/wiki/Selectieve_katalytische_reductie

8 Effect van combinatie van oplossingsrichtingen

- *Bij personenauto's en vrachtauto's is er voldoende potentieel om het CO₂-doel van –60 à -80 procent in 2050 te halen met combinaties van opties uit de oplossingsrichtingen KILOMETERS, VOERTUIG en ENERGIE en zelfs met alleen combinaties van de oplossingsrichtingen VOERTUIG en ENERGIE. Bij personenauto's is het aantal mogelijke combinaties substantieel groter dan bij vrachtwagens.*
- *Bij vrachtwagens is het 60 procent-doel haalbaar met zuinige vrachtwagens en minimaal 85 procent biobrandstof, het 80 procent-doel met 100 procent inzet van biobrandstof.*
- *De emissies van NO_x en PM₁₀ en de olieafhankelijkheid nemen ten opzichte van de referentiesituatie in 2050 in gelijke mate af als de emissies van CO₂. Alleen toepassing van biobrandstof heeft op NO_x en PM₁₀ geen reducerend effect.*
- *Oplossingsrichting FILTER levert ten opzichte van de referentiesituatie weinig additioneel effect op. Dit effect hebben we niet gekwantificeerd.*

In de hoofdstukken 4, 5, 6 en 7 zijn de effecten van de vier oplossingsrichtingen afzonderlijk aan bod gekomen. Elk van de vier oplossingsrichtingen levert een specifiek effect op: minder gereden kilometers (bij KILOMETERS), energiezuiniger rijden per kilometer (bij VOERTUIG), minder emissies per gebruikte eenheid energie (bij ENERGIE), dan wel minder emissies uit de uitlaat (bij FILTER).

Uit de afzonderlijke effecten wordt echter nog niet duidelijk wat het totale effect is op de emissies en de olieafhankelijkheid en of de gestelde doelen worden bereikt: in 2050 60 à 80 procent minder CO₂ dan in 1990 en grote reducties in de emissies van NO_x en PM₁₀ en de olieafhankelijkheid. Daar gaat dit hoofdstuk over: wat is het totaaleffect, indien de oplossingsrichtingen gelijktijdig worden toegepast en welk gewicht leggen de verschillende oplossingsrichtingen hierbij in de schaal?

8.1 Totaaleffect op emissies bij verschillende combinaties

Zoals uitgelegd in hoofdstuk 2, is het totaaleffect dat ontstaat wanneer oplossingsrichtingen gelijktijdig worden toegepast, te berekenen door de effecten van de aparte oplossingsrichtingen met elkaar te vermenigvuldigen.

Voor CO₂ is het resultaat van deze vermenigvuldiging weergegeven in figuur 8.1 hieronder. Bij CO₂ gaat het om een vermenigvuldiging van de effecten van de oplossingsrichtingen KILOMETERS, VOERTUIG en ENERGIE.

De twee meest linkse kolommen op de x-as geven de referentiesituatie weer; de kolommen daarnaast een serie combinaties van opties uit KILOMETERS, VOERTUIG en ENERGIE. Deze combinaties zijn samengesteld uit de opties die bij de respectievelijke oplossingsrichtingen zijn behandeld. Vanwege de veelheid aan opties kunnen we niet alle mogelijke combinaties weergeven. We hebben een selectie gemaakt van logische combinaties, die zo veel mogelijk inzicht geven in de mate van doelbereik.

Als bijdrage van de oplossingsrichting KILOMETERS hebben we in alle combinaties de 'optelsom' ingezet (dus thuiswerken, elektronisch winkelen en vergaderen,

modal shift, verbeterde logistiek, compacte steden en een hogere kilometerprijs in het wegverkeer). Bij de oplossingsrichtingen VOERTUIG en ENERGIE gaat het om logische combinaties van voertuig en brandstof.

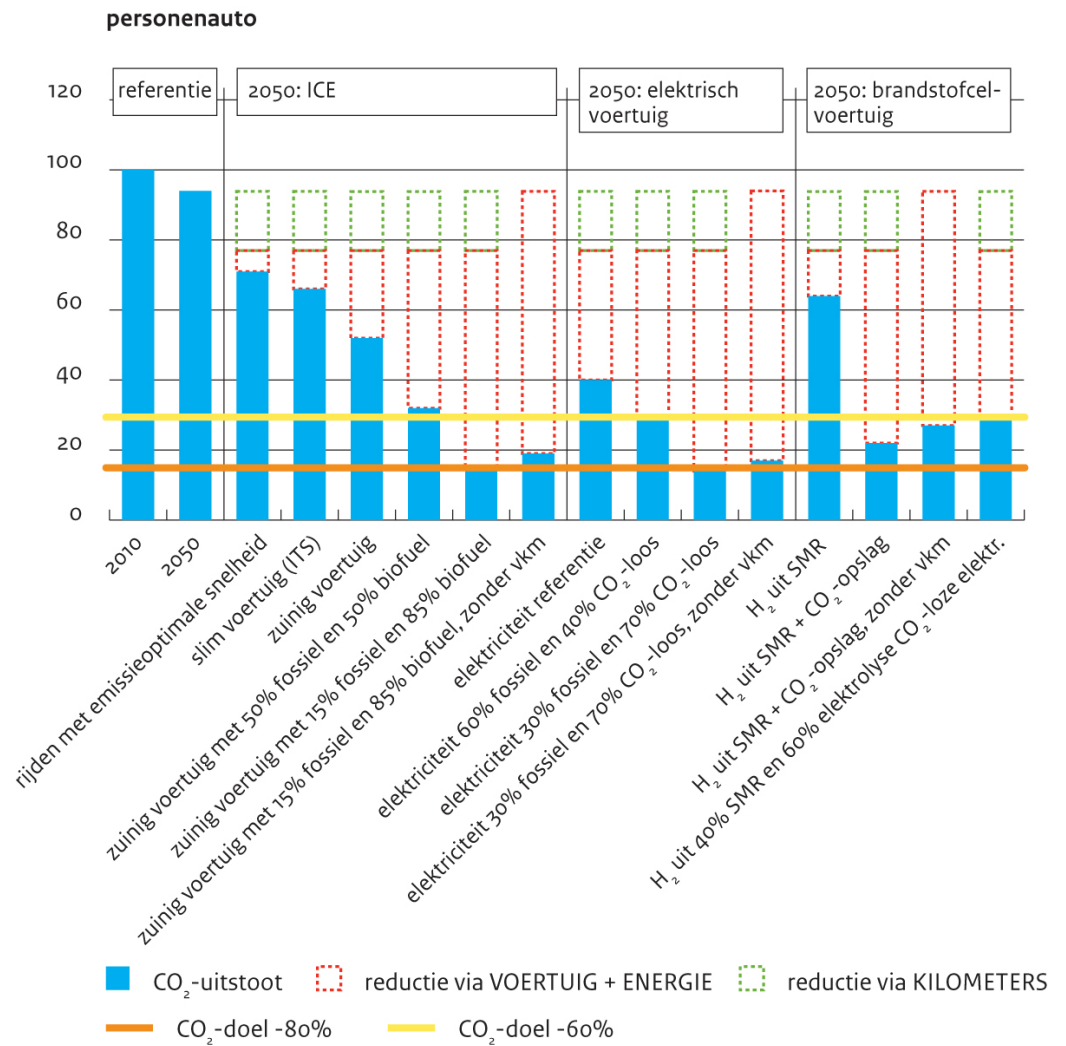
In blauw is de CO₂-uitstoot weergegeven: in de twee meest linkse kolommen de CO₂-uitstoot in de referentiesituatie, in de overige kolommen de CO₂-uitstoot die overblijft na toepassing van de betreffende combinatie van opties uit KILOMETERS, VOERTUIG en ENERGIE. De CO₂-reductie als gevolg van oplossingsrichting KILOMETERS is groengestippeld weergegeven, de CO₂-reductie van VOERTUIG en ENERGIE samen roodgestippeld. De gele en oranje horizontale lijnen representeren de bandbreedte van het -60 à -80 procent-doel voor CO₂ ten opzichte van 1990.

Voor NO_x en PM₁₀ gaan de emissies (ten opzichte van de referentiesituatie) gelijk op met die van CO₂.³⁹ Uiteraard is wel de referentiesituatie bij NO_x en PM₁₀ anders dan die bij CO₂. Het effect ten opzichte van de referentie (dat dus voor beide verschillend is), is echter wel vergelijkbaar. Uitzondering is de toepassing van biobrandstof: die heeft op CO₂ wel een positief effect, terwijl op NO_x en PM₁₀ het effect (zonder aanvullende maatregelen) neutraal of zelfs negatief is.

³⁹ Bij NO_x en PM moet in principe ook FILTER nog worden toegevoegd als vermenigvuldigingsfactor. Zoals aangegeven in hoofdstuk 7 is het effect van de opties van FILTER ten opzichte van de referentiesituatie niet groot, zodat we deze factor voor het gemak op '1' hebben gesteld.

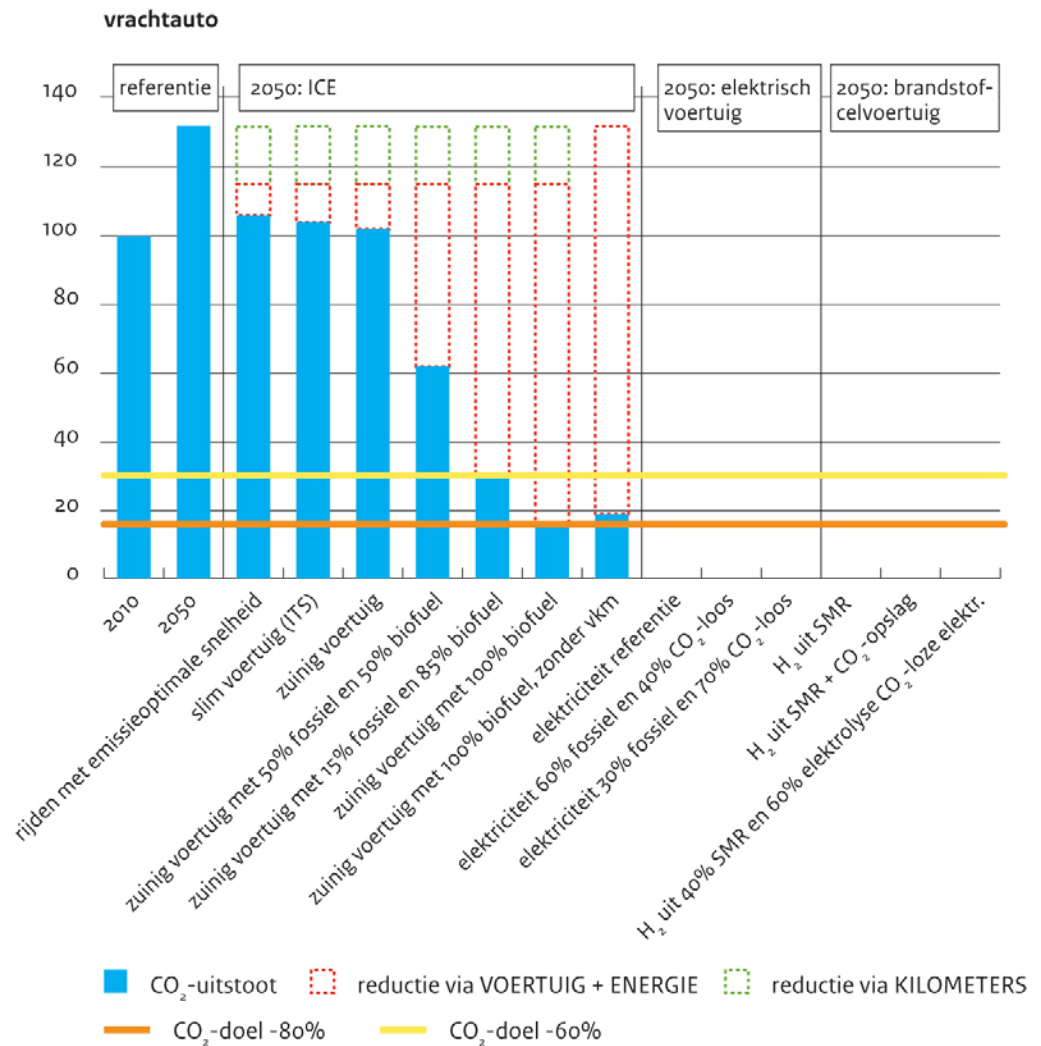
Figuur 8.1a

Kwantitatief effect bij personenauto (ordegrootte; 2010=100) op de CO₂-emissie bij combinatie van de oplossingsrichtingen KILOMETERS, VOERTUIG en ENERGIE, afgezet tegen de referentiesituatie. NO_x en PM₁₀ nemen ten opzichte van de referentiesituatie in 2050 in gelijke mate af als CO₂, behalve in het geval van toepassing van biobrandstof
Bron: combinatie van de effecten van de verschillende oplossingsrichtingen (zie de figuren 4.1, 5.1 en 6.1)



Figuur 8.1b

Kwantitatief effect bij vrachtauto (ordegrootte; 2010=100) op de CO₂-emissie bij combinatie van de oplossingsrichtingen KILOMETERS, VOERTUIG en ENERGIE, afgezet tegen de referentiesituatie. NO_x en PM₁₀ nemen ten opzichte van de referentiesituatie in 2050 in gelijke mate af als CO₂, behalve in het geval van toepassing van biobrandstof
Bron: combinatie van de effecten van de verschillende oplossingsrichtingen (zie de figuren 4.1, 5.1 en 6.1)



8.2

Emissiedoelen bereikt?

Zoals te zien is in figuur 8.1 is bij personenauto's het CO₂-doel van -60 à -80 procent te bereiken met de combinatie van enerzijds de 'optelsom' van opties binnen KILOMETERS en anderzijds:

1. zuinige voertuigen (VOERTUIG) en minimaal 50 procent bijmenging van biobrandstof (ENERGIE);
2. elektrische voertuigen (VOERTUIG) in combinatie met minimaal 40 procent CO₂-loze stroom (ENERGIE);
3. brandstofcelvoertuigen (VOERTUIG) in combinatie met waterstof uit aardgas (SMR) mits CO₂-opslag wordt toegepast (ENERGIE), of met waterstof die voor 60 procent of meer uit elektrolyse van CO₂-loze elektriciteit is gemaakt (ENERGIE).

Ook zonder gebruik te maken van de oplossingsrichting KILOMETERS is het CO₂-doel bij personenauto's haalbaar. Dit is in de grafiek geïllustreerd met de drie

kolommen waarin de oplossingsrichting KILOMETERS geen bijdrage levert (dus zonder groengestippeld blokje): de totale CO₂-uitstoot ten opzichte van de situatie dat oplossingsrichting KILOMETERS wel wordt ingezet neemt (licht) toe, maar blijft binnen de bandbreedte van 60 à 80 procent. Het effect van het weglaten van KILOMETERS zou kunnen worden gecompenseerd door bij oplossingsrichting ENERGIE het aandeel CO₂-loze energie (per eenheid energie) iets te laten toenemen.⁴⁰

Opmerkelijk is dat bij toepassing van elektriciteit uit het referentie-elektricitetspark het CO₂-doel met elektrische auto's niet binnen bereik is. Evenmin is dit het geval wanneer bij brandstofcelvoertuigen waterstof wordt toegepast volgens het procédé dat nu hiervoor het meest gebruikelijk is, namelijk aardgasreforming (SMR). Het positieve effect dat ontstaat doordat de (elektro)motor van elektrische en brandstofcelvoertuigen veel zuiniger is dan de verbrandingsmotor, is op zichzelf dus niet voldoende om het CO₂-doel te bereiken: het toepassen van emissiearme(re) vormen van elektriciteit en waterstof is eveneens noodzakelijk.

Tegelijk met de uitstoot van CO₂ nemen ook de emissies van NO_x en PM₁₀ en de olieafhankelijkheid ten opzichte van de referentiesituatie evenredig af. Het doel om een grote reductie van NO_x, PM₁₀ en de olieafhankelijkheid te bereiken (ten opzichte van de referentiesituatie) is dus eveneens haalbaar.

Voor vrachtwagens is het beeld anders dan bij personenauto's. Zoals bekend zijn elektrische en brandstofcelvoertuigen hier minder goed toepasbaar (zeker bij langere afstanden), zodat ook emissiearme elektriciteit en waterstof hier geen bijdrage kunnen leveren.

Zoals te zien is in figuur 8.1 is bij vrachtauto's het CO₂-doel van -60 procent nipt haalbaar door combinatie van enerzijds de 'optelsom' van opties van de oplossingsrichting KILOMETERS en anderzijds zuinige vrachtwagens (VOERTUIG) in combinatie met 85 procent bijmenging van biobrandstof. Bij 100 procent bijmenging van biobrandstof is zelfs het 80 procent-doel net binnen bereik. In dat geval is het doel (bijna) haalbaar zonder gelijktijdige reductie van voertuigkilometers, zoals blijkt uit de meest rechtse kolom in de grafiek (de kolom zonder groengestippeld blokje).

⁴⁰ Wanneer er méér kilometers worden gereden, neemt uiteraard ook de absolute hoeveelheid benodigde energie toe, los van de vraag hoe groot het aandeel CO₂-loze energie (per eenheid energie) is.

9 Belemmerende factoren bij de oplossingsrichtingen

- *De opties waarmee in 2050 een CO₂-emissiereductie van 60 à 80 procent ten opzichte van 1990 te bereiken is, komen niet vanzelf tot stand. Er zijn belemmerende factoren, met name op het gebied van kosten en maatschappelijk draagvlak.*
- *De alternatieve voertuigtypen en energiedragers van de oplossingsrichtingen VOERTUIG en ENERGIE zijn nog niet commercieel verkrijgbaar. Een aanzienlijke technische ontwikkeling is nodig om de kosten ervan te verlagen. Ze bieden geen extra gebruikersgemak, waardoor ook beperkt maatschappelijk draagvlak een belemmering kan zijn.*
- *Ook na kostenverlaging door technische ontwikkeling blijven de alternatieve voertuigen en energiedragers mogelijk duurder dan de (vervuilende) voertuigen en brandstoffen in de referentiesituatie.*
- *Bij de opties op het gebied van kilometerreductie kunnen hoge kosten en gering maatschappelijk draagvlak eveneens belemmerend werken.*

In dit hoofdstuk gaan we per oplossingsrichting in op de kosten en complexiteit van de onderscheiden opties. Het gaat om de *out-of-pocket* kosten voor burgers en bedrijven. Onder complexiteit verstaan we aspecten zoals het maatschappelijk draagvlak (bij burgers en bedrijven), risico's en onzekerheden bij de invoering - bijvoorbeeld er is nog veel technische ontwikkeling nodig, waarvan het onzeker is of die voorspoedig verloopt - en de vraag of invoering van de optie ingewikkeld is, bijvoorbeeld omdat er veel partijen bij betrokken zijn.

9.1 Kosten en complexiteit oplossingsrichting KILOMETERS

ICT

We verwachten dat er weinig belemmeringen zijn om het potentieel van thuis- en plaatsonafhankelijk werken, elektronisch winkelen en elektronisch vergaderen te realiseren (eigen analyse KiM). Deze opties hebben namelijk als voordeel dat ze passen bij bestaande maatschappelijke trends en wensen van werknemers, werkgevers en consumenten en dat de kosten beperkt zijn of er zelfs sprake is van een kostenbesparing. Wel is vaak een mentaliteitsverandering vereist. Bijvoorbeeld een verandering van de bedrijfscultuur in het geval van thuiswerken of een aanpassing aan de veranderende wensen van de consument in het geval van elektronisch winkelen: om te kunnen overleven zullen veel winkelbedrijven wel móeten veranderen. Hieronder gaan we in op de kosten en complexiteit van de drie subopties binnen deze optie.

ICT - Thuis- en plaatsonafhankelijk werken

- **Kosten**
Thuis- en plaatsonafhankelijk werken vergt per medewerker een eenmalige (beperkte) investering in de benodigde ICT en alternatieve werkplek, thuis of elders. Als ook het kantoorconcept van een bedrijf wordt aangepast, zijn de investeringskosten groter, maar kunnen tegelijk kosten worden bespaard door een hogere bezettingsgraad van werkplekken en/of minder werkplekken (20-40 procent). Op termijn levert dit bedrijven vaak een aanzienlijke besparing op. Werknemers kunnen door thuiswerken een besparing op reiskosten realiseren.

- **Complexiteit**
Het aantal mensen dat thuis werkt is momenteel klein ten opzichte van het potentieel aan thuiswerkers: ongeveer 8 procent van de beroepsbevolking werkt één of enkele dagen per week thuis in combinatie met de overige dagen op kantoor (KiM, 2007), tegenover 42 procent die aangeeft - onder condities - te kunnen thuiswerken (Kouwenhoven, 2005).
Voor het stimuleren van thuis- en plaatsonafhankelijk werken is een gedragsverandering bij medewerkers noodzakelijk, maar ook bij het management (medewerkers afrekenen op output in plaats van op input en aanwezigheid, vertrouwen in plaats van controle, minder regels, meer verantwoordelijkheid bij de medewerkers zelf) (Blauw Research, 2010; Frisblik, 2009). Als belangrijkste obstakel om thuis te werken noemen werknemers niet tegenwerking van de werkgever of het gebrek aan faciliteiten, maar het gemis aan interactie met collega's (Bijlsma, 2010). Verder kan een ongewenst *rebound*-effect optreden als werknemers vanwege thuiswerkfaciliteiten (op termijn) verder van hun werk gaan wonen. Het potentieel van deze optie voor de reductie van het aantal woon-werkkilometers wordt daarmee op den duur licht afgezwakt.

ICT – Elektronisch winkelen

- **Kosten**
De kosten van elektronisch winkelen zijn op zich gering. De consument hoeft alleen te beschikken over internet om zijn bestelling te kunnen doen. Om consumenten te kunnen blijven trekken en te overleven, zullen winkels hoe dan ook een omslag moeten maken. Internet zal geïntegreerd moeten worden in de bedrijfsprocessen.
- **Complexiteit**
Er is een risico dat de afname van het aantal verplaatsingen met winkelmotief teniet wordt gedaan door de groei van het aantal kilometers dat besteldiensten afleggen. Bij de positieve score van deze optie op het gebied van emissies (zie tabel 4.1) hebben we als voorwaarde aangegeven dat er een oplossing komt voor de thuisbezorging. Daarmee wordt de complexiteit van deze optie groter, alleen al doordat het aantal actoren en processen dat erbij betrokken moet worden toeneemt. Een mogelijke invulling is bijvoorbeeld om consumenten zelf de goederen te laten ophalen. In Duitsland (Weltevreden, 2008) zijn op goed bereikbare plaatsen (bijvoorbeeld stations) kluisjes geplaatst, die consumenten met een code kunnen openen. Enerzijds is dit gemakkelijk, anderzijds is het onpersoonlijk en zal niet door iedereen als plezierig worden ervaren. Ook winkels kunnen een belangrijke rol spelen door als afhaalpunt van goederen te gaan fungeren. Doordat bekend is wat de consument wanneer komt ophalen, kan de opslagcapaciteit van de winkel worden beperkt en kan tegelijkertijd via internet een ruimer assortiment worden aangeboden. Voorwaarde is dat deze winkels op goed bereikbare locaties liggen en ruime openingstijden hebben (Hoofdbedrijfschap Detailhandel, 2010).

ICT – Elektronisch vergaderen

- **Kosten**
De kosten van elektronisch vergaderen (*videoconferencing*) voor bedrijven zijn beperkt, zeker voor de grote bedrijven met veel medewerkers die ervan gebruik kunnen maken. Er is ook een kostenbesparing mogelijk,

bijvoorbeeld op reis- en verblijfskosten van medewerkers (bij buitenlandse reizen).

- **Complexiteit**
De complexiteit is op zich gering. Binnen multinationals wordt het al in toenemende mate toegepast.

Compacte steden/verdichting

- **Kosten**
De kosten van compact bouwen voor projectontwikkelaars zijn over het algemeen hoog, door hoge grondprijzen en doordat veel steden nu al behoorlijk compact zijn. Compact bouwen zal leiden tot hoge onroerendgoedprijzen.
- **Complexiteit**
Een niet onaanzienlijke belemmering bij het realiseren van een compacte(re) stad is dat de stad van 2050 er grotendeels al staat, omdat gebieden vaak lange tijd hetzelfde blijven (Kampman, 2009; PBL, 2007). Het is geen sinecure om in een bestaande stad de bebouwingsdichtheid te verhogen en functies te mengen en dichter bij elkaar te brengen. Compact bouwen heeft bovendien te kampen met een beperkt maatschappelijk draagvlak. Het sluit niet aan bij de wensen van woonconsumenten en bedrijven, die juist eerder ruim willen wonen (Gordijn, 2003). De hoge onroerendgoedprijzen waar compact bouwen toe leidt, kunnen als effect hebben dat huishoudens met lagere inkomens uit de stad verhuizen (Kampman, 2009). Compact bouwen zal door de normale marktwerking van vraag en aanbod niet tot stand komen. En zelfs als het lukt om te verdichten, is succes bij het verminderen van voertuigkilometers niet verzekerd. Zoals we zagen in hoofdstuk 3 zijn er meerdere oorzaak-gevolgrelaties en evenwichten mogelijk, zodat een compacte stedelijke structuur niet automatisch leidt tot een afname van het aantal wegvoertuigkilometers.
Ruimtelijke ingrepen met als doel het aantal verplaatsingen te beperken zijn in het verleden niet altijd succesvol geweest. Bijvoorbeeld de ontwikkeling van Vinex-locaties heeft niet geleid tot korte woon-werkafstanden of minder autogebruik (Dieleman, 1999). De belangrijkste reden hiervoor was dat het autogebruik steeds goedkoper en sneller werd, mede dankzij verbeteringen in de weginfrastructuur. Om het potentieel van compacte steden op het verminderen van de mobiliteit te verzilveren is dus een overheidsinterventie nodig, die succesvoller is dan wat tot nu toe is geprobeerd.

Modal shift

- **Kosten**
Ervan uitgaande dat een deel van de modal shift bereikt wordt door uitbreiding en kwaliteitsverbetering van het huidige openbaarvervoersysteem, zijn aan deze optie aanzienlijke kosten verbonden. Denk aan nieuwe openbaarvervoersvoorzieningen en investeringen in railinfrastructuur of anderszins een sterke comfortverbetering van het bestaande openbaar vervoer.
- **Complexiteit**
Er is geen groot maatschappelijk draagvlak voor *modal shift*. In het personenvervoer laten bovendien vele ex-poststudies zien dat bij nieuwe openbaarvervoersvoorzieningen de overgang van auto naar openbaar

vervoer beperkt is. In het gunstigste geval is een kwart van de gebruikers van een nieuwe openbaarvervoersvoorziening afkomstig uit de auto, maar meestal zijn de effecten veel lager (AVV, 2004). Dat komt vooral omdat auto en openbaar vervoer gescheiden markten zijn met verschillende groepen gebruikers, die elk hun voorkeuren en wensen hebben (Baanders, 1993; Baanders, 2010). Het voor- en natransport is nog een extra belemmering voor meer gebruik van openbaar vervoer. In de beleving van (potentiële) reizigers weegt voor- en natransport extra zwaar, nog los van de pure kloktijd die ermee gemoeid is.

Soortgelijke belemmeringen treden momenteel op in het goederenvervoer. De goederenmarkt werkt vraaggestuurd en klanten vragen voor veel goederen *just-in-time delivery*. Dat veel bestemmingen niet rechtstreeks per rail of water te bereiken zijn werkt eveneens belemmerend.⁴¹

Een risico van grootschalige investeringen in openbaar vervoer is dat *rebound*-effecten optreden, bijvoorbeeld dat mensen verder van hun werk gaan wonen of meer gaan reizen.

Verbeterde logistiek in het vrachtverkeer

- **Kosten**
Maatregelen voor een verbeterde benuttingsgraad van het vrachtwagenpark zijn vaak kosteneffectief (Lensink, 2007). Maar kosteneffectiviteit is voor de transportsector vaak niet het belangrijkste criterium om maatregelen door te voeren (zie onder Complexiteit). Kosten voor verhoogde inzet van langere en zwaardere vrachtwagens (LZV's) zijn voor de overheid in Nederland beperkt omdat LZV's al toegelaten worden. In andere EU-lidstaten waar dat nu nog niet het geval is, kunnen de kosten oplopen vanwege investeringen in bruggen en viaducten.
- **Complexiteit**
Het potentieel van een verbeterde logistiek van het vrachtwagenpark (dezelfde hoeveelheid goederen vervoeren met minder voertuigkilometers) komt niet vanzelf tot stand. In het vrachtverkeer bestaat circa 25 tot 40 procent van de transportkosten uit brandstofkosten (Lensink, 2007). Er wordt door de sector al veel gedaan om de brandstofkosten zoveel mogelijk te beperken, zowel door verbeterde logistiek als door energiezuinigere voertuigen. Er zijn diverse redenen waarom het voor een vervoerder niet mogelijk of zinvol is om (verder) te optimaliseren op de logistiek, ook al bespaart hij daarmee brandstofkosten. Voorbeelden (Francke, 2009; Lensink, 2007; Kampman, 2009):
 - De vervoermarkt is heterogeen: er zijn veel verschillende deelmarkten, de eisen die vanuit de aard van de vervoerde goederen worden gesteld zijn divers, gewenste kwaliteitsniveaus kunnen sterk verschillen etc.
 - Er is gebrek aan informatie over de actuele vraag en het aanbod bij de vervoerder en verlader.
 - De kosten van transport zijn laag (in verhouding tot de waarde van de vervoerde goederen): de verlader betaalt gewoon voor de niet-gebruikte capaciteit.

⁴¹ Wanneer er per waterweg of spoor een grote omweg moet worden gemaakt, doet dit bovendien de CO₂-winst ten opzichte van het wegverkeer teniet (Den Boer, 2011).

- De transportsector hanteert zeer korte terugverdiertijden, circa 3 jaar (Lensink, 2007). Ook al zijn maatregelen kosteneffectief, ze worden toch niet getroffen omdat ze zichzelf niet snel genoeg terugverdienen.
- Er is veel concurrentie tussen vervoerders, waardoor er onder de kostprijs vervoerd wordt en er geen sprake is van een optimale belading.
- Er wordt steeds meer vraaggestuurd gewerkt, waarbij de vraag van klanten naar *just-in-time delivery* bepalend is. Dit stimuleert de inzet van kleine voertuigen en lage beladingsgraden.
- Er zijn veel elkaar uitsluitende voorwaarden (bijvoorbeeld wat betreft openings- en venstertijden, toegestane voertuigtypen) vanuit verschillende partijen zoals verzendende verlader en ontvangende verlader, gemeentelijke overheid/
- Er zijn vaak meerdere partijen betrokken, waardoor het niet vanzelfsprekend is dat opties met positieve baten ook worden geïmplementeerd (Lensink, 2007).
- De stadsdistributiecentra hebben een voldoende schaalgrootte nodig om te kunnen werken (Lewis, 2010). Vanwege het verschil in aanvoerlijnen, zal de *business case* sterk verschillen voor de potentiële deelnemende winkels en bedrijven.

Een risico bij verbeterde logistiek is dat te veel aan samenwerking kan leiden tot een monopoliepositie van een beperkt aantal partijen, dan wel een technocratisch plansysteem waarin geen vrije keuze meer overblijft. Het draagvlak voor verbeterde logistiek wordt vooral bepaald door de specifieke beleidsmaatregelen waarmee de gewenste ontwikkeling afgedwongen wordt.⁴²

Voor de inzet van lange en zware vrachtwagens geldt nog een specifieke belemmering vanuit de Europese regelgeving. Om de inzet van LZV's te vergroten moet de Europese standaard voor maten en gewichten van vrachtwagens zodanig worden aangepast dat langere en zwaardere voertuigen in alle EU-lidstaten worden toegelaten. Het maatschappelijk draagvlak voor LZV's wordt sterk beïnvloed door internationale organisaties zoals IRU (International Road Transport Union; wegvervoerders) en UIC en CER (International Union of Railways en Community of European Railways; spoorvervoerders en exploitanten van railinfrastructuur), die onderzoeken met tegengestelde resultaten naar buiten brengen. In Duitsland hebben tegenstanders de term 'Monstertrucks' geïntroduceerd. In Nederland is er geen probleem met maatschappelijk draagvlak, zolang er geen ernstige ongevallen plaatsvinden.

⁴² Bijvoorbeeld bij een repressief economisch of fiscaal beleidsinstrument, zal het draagvlak in beginsel niet groot zijn, maar wel groter dan bij een repressieve normering of verbod. Voor het belonen van goed gedrag via fiscale of economische maatregelen is wel draagvlak aanwezig, maar dit is waarschijnlijk minder effectief.

Hogere kilometerprijs wegverkeer

- **Kosten**
Een hogere kilometerprijs in het wegverkeer levert voor weggebruikers per gereden kilometer hogere *out-of-pocket* kosten op. Het minder rijden levert een kostenverlaging op.
- **Complexiteit**
Maatschappelijk draagvlak voor een hogere kilometerprijs is afhankelijk van de wijze waarop deze tot stand komt. In het geval van een realisatie via prijsbeleid (bijvoorbeeld heffingen) is draagvlak beperkt aanwezig. De acceptatie kan worden bevorderd door de opbrengsten te gebruiken voor het compenseren van negatieve effecten. Maatschappelijk draagvlak voor het principe van 'de vervuiler betaalt' is op zich wel aanwezig (Verhoef, 2004).

9.2

Kosten en complexiteit oplossingsrichting VOERTUIG

Zuinig ICE-voertuig

- **Kosten**
McKinsey (2009) schat in dat met de huidige beschikbare techniek bij personenauto's al 35 à 40 procent efficiencyverbetering mogelijk is ten opzichte van de huidige situatie, tegen meerkosten van ongeveer 3000 euro per voertuig. Sharpe (2009) heeft voor de Europese Commissie berekend wat het kost om de CO₂-uitstoot per kilometer van personenauto's in 2020 omlaag te brengen tot 95 g/km⁴³ (het nog niet wettelijk vastgelegde langetermijndoel voor 2020). Sharpe verwacht een stijging van de retailprijs van personenauto's met 15 à 20 procent ten opzichte van de retailprijs in 2006: 15 procent als het gebeurt via downsizen van het voertuig en 20 procent als het gebeurt via hybridisering. Een nog verdere verlaging tot 85 g/km zou een personenauto 20 à 30 procent duurder maken. (Overigens wordt een deel van het potentieel ook al in de referentiesituatie gerealiseerd, zodat de meerkosten ten opzichte van de referentiesituatie mogelijk lager zijn.)
- **Complexiteit**
Het is sterk de vraag of er draagvlak is voor kleine, zuinige auto's, voor zover dit betekent dat consumenten moeten inleveren op comfort en omvang (zitplaatsen, bagageruimte) van het voertuig. In de praktijk zijn voertuigen de laatste decennia groter en zwaarder geworden en is het aircogebruik toegenomen.
Een risico bij deze optie is de onzekerheid – zoals bij elke technische ontwikkeling – of de techniek echt de snelle ontwikkeling kan doormaken waardoor de kosten sterk omlaag kunnen.

Daarnaast is er het risico dat efficiencyverbetering leidt tot *rebound*-effecten: door de efficiencyverbetering nemen de brandstofkosten per kilometer af, wat een stimulans is om meer te rijden. Vooral bij vrachtauto's treden deze effecten in sterke mate op, maar ook bij personenauto's speelt dit een rol (Geilenkirchen, 2010; Lensink, 2007).

⁴³ De gemiddelde huidige nieuwe ICE-personenauto heeft een uitstoot van 160 g/km (King, 2007), 95 g/km is dus ongeveer 40 procent zuiniger.

Waar het gaat om het beleid om ICE-voertuigen zuiniger te maken, is in de praktijk gebleken dat met name het effect van emissienormen (sterk) kan tegenvallen. De huidige, wettelijk vastgelegde testcyclus waarmee autofabrikanten kunnen aantonen dat ze aan de emissienormen voldoen, is niet goed ontworpen. De op de weg gerealiseerde emissies vallen daardoor nu vaak hoger uit. In Nederland is de gemiddelde CO₂-uitstoot per kilometer van nieuwe personenauto's tussen 1998 en 2009 op papier met bijna 20 procent gedaald, van 181 g/km tot 147 g/km (PBL Compendium Leefomgeving). Het gaat hier om de testwaarde; in de praktijk is de daling minder groot. Berekend vanuit de brandstofafzetcijfers (CBS) in die periode, is de CO₂-uitstoot per kilometer van het totale wagenpark in diezelfde periode nauwelijks gedaald.

Emissieoptimale snelheid

- Kosten
Als het rijden met emissieoptimale snelheid wordt gerealiseerd via een lagere wettelijke maximumsnelheid zijn de kosten gering.
- Complexiteit
Rijden met emissieoptimale snelheid (bijvoorbeeld 80 km/uur op snelwegen) zal waarschijnlijk op weinig maatschappelijk draagvlak kunnen rekenen, behalve wellicht wanneer het wordt gemotiveerd vanuit verkeersveiligheid.

Slim voertuig (ITS)

- Kosten
De kosten van slimme voertuigen hangen sterk af van de specifieke techniek. Over het algemeen zullen kosten hoger zijn naarmate er meer wordt ingegrepen in de rijtaak. De relatief 'eenvoudige' systemen ACC en Stop & Go zijn nu al op duurdere automodellen aanwezig; gezien de lage kosten en verhoging van het rijcomfort, is het aannemelijk dat het gehele wagenpark (personen- en vrachtauto's) er in 2050 mee zal zijn uitgerust. C-ACC is duurder omdat er ook communicatie tussen voertuigen nodig is. Dit geldt in nog veel sterkere mate voor *platooning*, waarbij naast communicatie tussen voertuigen waarschijnlijk ook communicatie met de wegkantapparatuur nodig is voor geboden en verboden, maximumsnelheden, automatische incidentdetectie en dergelijke. Investeringen hierin zullen aanzienlijk zijn. Ook CICAS kent hoge kosten vanwege de noodzakelijke communicatie tussen voertuigen. Ook grijpt het CICAS-systeem in in de besturing van de auto. ICA communiceert niet met andere voertuigen, maar waarschuwt alleen en is daarom goedkoper in aanschaf.
- Complexiteit
De drijvende kracht achter ITS is niet milieu/emissiereductie, maar verkeersveiligheid en doorstroming. De complexiteit van de coöperatieve systemen (C-ACC, *platooning*, CICAS) is aanzienlijk. Deze kunnen alleen hun effect halen als er grote aantallen voertuigen mee zijn uitgerust. Specifiek bij *platooning* geldt dat techniek in ieder geval nog verder ontwikkeld zal moeten worden om *platooning* ook ter hoogte van discontinuïteiten (zoals in- en uitvoegstroken) goed te laten verlopen. Het is onzeker of de technische ontwikkeling inderdaad zo voorspoedig zal verlopen.

Bij de coöperatieve systemen zal de overheid in samenspraak met de industrie zorg moeten dragen voor standaardisering van de communicatie. Daarnaast moet er bandbreedte voor de communicatie beschikbaar komen. Aan de coöperatieve systemen kleven daarnaast juridische problemen, die eerst moeten worden opgelost. Wie is bijvoorbeeld aansprakelijk als het systeem faalt en er daardoor een botsing plaatsvindt? Het draagvlak bij automobilisten voor het overnemen van de rijtaak (met name bij C-ACC en *platooning*), zal naar verwachting ook niet al te groot zijn. Weliswaar ontstaat de mogelijkheid om tijdens het autorijden andere dingen te doen, maar dit gaat ten koste van het plezier van het autorijden. Ook de aandacht van weggebruikers voor de weg en de vaardigheid om de rijtaak zelf uit te voeren zal sterk afnemen.

Alternatieve aandrijfsystemen: elektrisch en brandstofcelvoertuig

- **Kosten**
Elektrische auto's en brandstofcelauto's zijn, zeker nu nog, relatief duur. Het is onzeker of het lukt om de kosten van deze voertuigen omlaag te krijgen. Vooral de accu en de brandstofcel zijn grote kostenposten. ECN schat in dat elektrische en brandstofcelauto's in 2040 circa 3000 à 5000 euro duurder zullen zijn dan diesel/benzineauto's, maar dan wel onder de voorwaarde dat Europa voldoende stimulerend beleid voert om een sterke kostendaling mogelijk te maken (Hanschke, 2009, p.97). Een als-dan redenering dus. Ter vergelijking: in 2005 waren de meerkosten van een elektrische en brandstofcelpersonenauto volgens ECN respectievelijk 15.000 en 50.000 euro.
Over het algemeen geldt: hoe hoger de actieradius van het voertuig, hoe groter en duurder de accu. Door toepassing in andere sectoren zijn de kosten van accu's al sterk gedaald (Hanschke, 2009, p.13). De vooruitzichten zijn dat de kosten nog (ver) naar beneden kunnen (o.a. Van Essen, 2011; Hoen, 2009). Voor een deel is dit wel een kip-ei-verhaal: de kosten zullen pas sterk kunnen gaan dalen als er een grootschalige afzet is van elektrische voertuigen (Hoen, 2009).

Over de vraag of de hogere kosten voor de elektrische en brandstofcelvoertuigen (ten opzichte van benzine/dieselvoertuigen) worden gecompenseerd door lagere energiekosten, zijn in de literatuur verschillende visies te vinden. ECN gaat ervan uit dat er netto sprake zal zijn van meerkosten (ten opzichte van benzine/dieselvoertuigen) van rond de 100 euro per vermeden ton CO₂ in 2040, ook weer onder de voorwaarde van sterke kostendaling door stimulerend beleid (Hanschke, 2009, p.34). Ook Fulton (2010) verwacht op de lange termijn netto-meerkosten voor elektrische voertuigen ten opzichte van benzine/dieselvoertuigen: de lagere energiekosten zouden de hogere voertuigkosten maar voor ongeveer de helft compenseren⁴⁴; met een (plug-in) hybride is wel een netto-kostenbesparing mogelijk, maar is het milieueffect weer een stuk minder. McKinsey (2010) daarentegen, verwacht dat elektrische en

⁴⁴ Bij een voertuig dat 160.000 kilometer rijdt, een olieprijs van \$120 per vat en een gunstige ontwikkeling van de accukosten.

brandstofcelvoertuigen op de lange termijn (2050) geen (of weinig) meerkosten zullen hebben ten opzichte van benzine/dieselveertuigen.⁴⁵

- Complexiteit

Het maatschappelijk draagvlak voor alternatieve voertuigen kan een belemmerende factor zijn. Elektrische en brandstofcelvoertuigen bieden in vergelijking tot een traditioneel ICE-voertuig geen extra gebruikersgemak en hebben waarschijnlijk (blijvend) hogere kosten. Bij elektrische auto's zijn daarnaast ook het opladen en de beperkte actieradius potentiële barrières in de toepassing ervan (Hoen, 2009, p.24-25). Veel mensen wonen in flats en zullen afhankelijk zijn van publieke oplaadplaatsen; daarvan moeten er dan wel voldoende zijn. Ook de lange oplaadtijd kan een barrière vormen. Snel opladen is technisch wel mogelijk, maar zal een stuk duurder zijn dan langzaam opladen (Hanschke, 2009, p.56-58). Van Essen (2011) merkt verder op dat elektrische auto's weliswaar dezelfde snelheid kunnen halen als auto's met een ICE, maar dat ze die hoge snelheid minder lang kunnen volhouden.

Bij brandstofcelvoertuigen speelt de barrière van de actieradius iets minder: volgens Hanschke (2009, p.47) is de actieradius van een waterstofauto groter dan van een elektrische auto en in de toekomst waarschijnlijk vergelijkbaar met die van een conventionele auto. Bij

brandstofcelvoertuigen kan wel het gebrek aan tankstations (in de aanloopfase) een belemmering zijn, omdat de aanleg van een waterstofdistributiesysteem zeer duur is en pas zal gebeuren bij een grote penetratiegraad. Hier wordt in paragraaf 9.3 verder op ingegaan.

Een ander type complexiteit vormt de inpassing van het opladen van elektrische voertuigen in het elektriciteitsnet (o.a. Hanschke, 2009, p.57). Inzet van elektrische voertuigen kan in potentie bijdragen aan een optimalisatie van elektriciteitscentrales in Nederland (*peak shaving*). Inzet van variabele hernieuwbare energie (zon, wind) kan bevorderd worden als het mogelijk wordt opladen van auto's centraal te regelen.

Specifiek voor waterstof geldt verder dat aandacht besteed moet worden aan veilige opslag omdat waterstof explosief is. Daarnaast is waterstof bij een buitentemperatuur onder het vriespunt niet bruikbaar (Hoen, 2009, p.26).

Al met al ligt er een grote uitdaging op het gebied van het maatschappelijk draagvlak voor nieuwe voertuigtypen. We moeten niet onderschatten hoe moeilijk het is een voertuig aan de man te brengen dat minder kan en ook nog eens duurder is dan de technologie die het vervangt (Tavasszy, 2009). De vergelijking met bijvoorbeeld computers en mobiele telefonie, waar een razendsnelle penetratie plaatsvond, gaat hier niet op. Daarvoor is het comfort van de huidige auto te groot, terwijl het alternatief weinig tot geen (nieuw) gebruikersgemak oplevert. Wel kan ingespeeld worden op mechanismen die het aankoopgedrag van consumenten beïnvloeden, zoals de auto als statussymbool en de behoefte van mensen zich te onderscheiden. Dit verklaart mede waarom een auto als de Toyota Prius in bepaalde kringen zo populair is geworden. Een andere manier is om bezitters van een alternatief voertuig privileges te geven, zoals een

⁴⁵ McKinsey neemt in de kostenvergelijking tussen de verschillende aandrijfsystemen ook de kosten van onderhoud en energie-infrastructuur mee.

parkeerplek op een gunstige locatie of lagere heffingen. In Londen bijvoorbeeld zijn elektrische voertuigen vrijgesteld van de congestieheffing (TFL, 2011).

9.3 Kosten en complexiteit oplossingsrichting ENERGIE

Biobrandstof

- **Kosten**
De kosten van biobrandstoffen zijn een potentiële belemmerende factor. De komende decennia blijven alle biobrandstoffen naar verwachting duurder dan fossiele brandstoffen (Hammingh, 2010, p.39). In hoeverre de kosten naar beneden gaan, is sterk afhankelijk van een succesvolle technische ontwikkeling en toename van productievolumes. Hill (2010, p.125-126) schat overigens in dat biobrandstof in 2050 even duur zal zijn als fossiele brandstof, maar het is onduidelijk waarop dit is gebaseerd.
- **Complexiteit**
Het maatschappelijk draagvlak voor het gebruik van biobrandstoffen is waarschijnlijk geen probleem omdat ze in het gebruik sterk lijken op de huidige fossiele brandstoffen. Ze bieden de gebruiker echter ook geen voordelen.
Voldoende beschikbaarheid van biobrandstoffen is wel een grote potentiële belemmering (Skinner, 2010; PBL, 2009; Hoen, 2009). Er zijn verschillende sectoren die concurreren om dezelfde biomassa. Bijvoorbeeld veel biomassa die geschikt is voor biobrandstoffen is ook bruikbaar voor rechtstreekse verbranding in elektriciteitscentrales en kunnen daar zelfs een hoger milieurendement opleveren (Kampman, 2003). De concurrentie met de voedselvoorziening is bij de tweede generatie biobrandstof minder groot dan bij de eerste, maar als het gaat om speciaal geteelde energiegewassen is er nog wel concurrentie om grond en voedingsstoffen. Als het gaat om reststromen (bijvoorbeeld *black liquor*, het residu uit de papierindustrie) is het maar de vraag of die in voldoende grote hoeveelheden beschikbaar zullen komen.

Het is daarom nog onzeker of er op termijn voldoende biobrandstoffen beschikbaar zijn voor een grootschalige inzet ervan. Hoen (2009, p.27) haalt een IEA-schatting uit 2006 aan dat het marktaandeel van biobrandstof in de transportsector op termijn beperkt zal blijven tot hooguit 13 procent. Skinner (2010) gaat ervan uit dat er per transportmodaliteit (inclusief lucht- en scheepvaart) maximaal 40 procent biobrandstof beschikbaar is. Het gaat dan om biomassa van Europese oorsprong (gebaseerd op Biofrac, 2006).

Vanwege deze beperkte beschikbaarheid raden verschillende studies (o.a. Hoen, 2009, p.31) aan om biobrandstoffen te reserveren voor die transportsectoren die weinig andere mogelijkheden hebben (vrachtverkeer over de weg, lucht- en scheepvaart). Volgens het PBL zou de beschikbare biomassa toereikend moeten zijn om al deze langeafstandsmodaliteiten van biobrandstof te voorzien.⁴⁶

⁴⁶ Anco Hoen, PBL, *personal communication*.

Emissiearme elektriciteit

- **Kosten**
ECF (2009) schat in dat *nearly zero-carbon*-elektriciteit⁴⁷ in 2050 ongeveer 10 à 15 procent per kWh duurder is dan elektriciteit in de referentiesituatie. Daarbij maakt het voor de kosten niet uit of de CO₂-reductie wordt gehaald via hernieuwbare elektriciteit, kernenergie en/of CO₂-opslag (CCS).
- **Complexiteit**
Beschikbaarheid van emissiearme elektriciteit is technisch in principe geen probleem, want er zijn veel bronnen waaruit dit gemaakt kan worden. Dit zorgt voor een risicospreiding: er is geen afhankelijkheid van één type elektriciteitsproductie of brandstof. ECF (2009) schat in dat *nearly zero-carbon*-elektriciteit in 2050 haalbaar is met technieken die nu al commercieel beschikbaar en/of in een verontwikkeld stadium zijn. Bij een geleidelijke groei van het aantal elektrische auto's hoeft ook de leveringszekerheid van energie niet in gevaar te komen, bijvoorbeeld omdat het elektriciteitspark de groei in de elektriciteitsvraag niet zou kunnen bijbenen. Als alle Nederlandse personenautokilometers op dit moment elektrisch zouden worden gereden, zou de Nederlandse elektriciteitsvraag met ongeveer 15 procent stijgen (eigen berekening KIM); dit betekent evenwel niet dat 15 procent extra productiecapaciteit nodig is, omdat veel productiecapaciteit met name 's nachts onderbenut is. De complexiteit van inpassing van het opladen van elektrische auto's in de elektriciteitsinfrastructuur is ook al beschreven onder oplossing VOERTUIG. Wel kan het maatschappelijk draagvlak voor sommige vormen van opwekking van emissiearme elektriciteit een potentiële belemmering zijn. Dit geldt bijvoorbeeld voor windturbines op land of CO₂-opslag onder land.

Emissiearme waterstof

- **Kosten**
In de industrie wordt grootschalig waterstof via SMR uit aardgas geproduceerd tegen kosten van ongeveer 10 à 20 euro per gigajoule. Waterstof uit elektrolyse, veel emissiearmer dan waterstof uit SMR, is echter aanzienlijk duurder (Menkveld, 2004), mede vanwege de verliezen in het productieproces. Inzet van waterstof uit elektriciteit is sowieso relatief omslachtig: de waterstof wordt geproduceerd uit elektriciteit en in het voertuig wordt de waterstof met een brandstofcel weer terug omgezet in elektriciteit voor de elektromotor. Bij elke stap treden verliezen op, zodat van de oorspronkelijke elektriciteit uiteindelijk maar twee derde overblijft. Een brandstofcelvoertuig gebruikt dus anderhalf keer zoveel elektriciteit als een vergelijkbaar elektrisch voertuig dat rechtstreeks wordt gevoed met elektriciteit (E4 Tech 2007/King, 2007; Menkveld, 2004). Deze inefficiëntie is ook de reden dat bijvoorbeeld Gilbert & Perl (2008) erg kritisch zijn over de inzet van waterstof als CO₂-loze transportbrandstof en meer zien in elektrische voertuigen. Overigens verwacht ECN dat waterstof op basis van elektrolyse met elektriciteit uit hernieuwbare bron vanaf 2030 rendabel wordt (Hanschke, 2009).
- **Complexiteit**
Voor emissiearme waterstof zijn net als bij elektriciteit veel bronnen beschikbaar, waaronder emissiearme elektriciteit (via elektrolyse), maar

⁴⁷ Dat wil zeggen: met 95 à 100 procent minder CO₂ dan in de referentiesituatie.

ook aardgas (via *Methane Steam Reforming*, SMR) in combinatie met CO₂-opslag. Dit zorgt voor een risicospreiding. Net als bij elektriciteit kan bij waterstof het draagvlak voor bepaalde productievormen beperkt zijn, dit geldt bijvoorbeeld in sterke mate voor CO₂-opslag. Bij waterstof is daarnaast de beschikbaarheid 'aan de pomp' mogelijk een belemmering, omdat het zeer duur is om een waterstofdistributiesysteem aan te leggen, veel duurder dan het aanleggen van een elektrische infrastructuur voor het opladen van elektrische auto's (Hill, 2009, p.43). Waterstof is het kleinste molecuul dat bestaat en vergt speciale lekdichte transportbuizen en opslag. Waterstof zou in de aanloopfase (vóór grootschalige toepassing) ook via tankwagens gedistribueerd kunnen worden (Hanschke, 2009), wat het goedkoper maakt.

9.4 **Kosten en complexiteit van combinatie van oplossingsrichtingen**

Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat alle combinaties van opties die leiden tot het realiseren van het CO₂-doel (zie paragraaf 8.2), ten opzichte van in de referentiesituatie extra kosten en complexiteit met zich meebrengen.

De aard van de complexiteit verschilt echter:

- Bij de combinaties waarin alternatieve aandrijfsystemen een rol spelen (elektrische en brandstofcelvoertuigen) zijn forse veranderingen nodig bij zowel de autoproducenten als de energiesector, die moet zorgen voor de productie van emissiearme elektriciteit en waterstof). Ook voor de autogebruiker zijn er grote veranderingen op het gebied van opladen, tanken en/of actieradius.
- De combinaties waarin biobrandstof een rol speelt vergen bij de gebruiker relatief weinig aanpassingen, terwijl ze voor de oliemaatschappijen ingrijpend zijn.

10 Verzilveren

- *Een CO₂-reductie van 60 à 80 procent ten opzichte van 1990 wordt niet vanzelf gerealiseerd, er is (sterke) overheidsbetrokkenheid nodig.*
- *Een sterke technische ontwikkeling van alternatieve voertuigen en emissiearme energiedragers is noodzakelijk om de kosten omlaag te brengen. Ook het maatschappelijk draagvlak voor de emissiearme technieken is een aandachtspunt.*
- *Er moet voor gezorgd worden dat emissiearme technieken met (goedkopere) vervuilende technieken kunnen concurreren.*
- *Naast de 'traditionele' actoren, zoals autofabrikanten en oliemaatschappijen, is een belangrijke rol weggelegd voor de energiesector.*
- *Het tijdig inzetten van beleidsinstrumenten is nodig vanwege de lange doorlooptijden van de implementatie van nieuwe voertuigtypen en de grote investeringen die nodig zijn.*

In hoofdstuk 8 zagen we dat een CO₂-reductie van 60 à 80 procent en sterke vermindering van luchtvervuiling (NO_x en PM₁₀) en olieafhankelijkheid in principe mogelijk is met alternatieve voertuigen en emissiearme energie, al dan niet in combinatie met het verminderen van de mobiliteitsbehoefte. In dit hoofdstuk gaan we in op de voorwaarden waaraan voldaan moet worden om het potentieel van alternatieve voertuigen, emissiearme energie en verminderen van de mobiliteitsbehoefte te realiseren. Dat doen we aan de hand van vier vragen:

- Welke ontwikkelingen zijn nodig?
- Welke actoren zijn betrokken en welke rol spelen ze?
- Wanneer is betrokkenheid van actoren nodig?
- Op welke manier kunnen opties gerealiseerd worden?

Deze vragen worden in algemene, beschouwende zin beantwoord, voortbordurend op de bevindingen uit hoofdstuk 9 over belemmerende factoren (kosten, complexiteit) voor de realisatie van de verschillende opties. Het onderzoeken van concrete beleidsinstrumenten valt buiten de reikwijdte van deze verkenning.

10.1 Welke ontwikkelingen zijn nodig?

Autonome ontwikkelingen zijn onvoldoende

Een CO₂-emissiereductie van 60 à 80 procent ten opzichte van 1990 zal in 2050 niet vanzelf tot stand komen.⁴⁸ Het huidige tempo van efficiencyverbetering bij nieuwe voertuigen is ongeveer een half procent per jaar. Dit levert over 40 jaar voertuigen op die een kwart zuiniger zijn dan nu. Ook het huidige tempo met het verduurzamen van energie is laag: tussen 2001 en 2011 is het aandeel hernieuwbare energie in Nederland (over alle sectoren) gestegen van ca 1,5 naar 3,5 procent en het aandeel hernieuwbare elektriciteit van 3 naar 9 procent. Milieubewustzijn van burgers en bedrijven is waarschijnlijk een onvoldoende *driver* voor een grote emissiereductie. Het beperken van de emissies van het wegverkeer

⁴⁸ Gezien het referentiescenario, waarin de CO₂-uitstoot (licht) blijft stijgen (zie hoofdstuk 1).

is geen individueel belang, maar een collectief belang. Individuen die in actie willen komen, lopen vaak vast op het *prisoner's dilemma*: als de rest niet meedoet, is de winst voor het milieu klein, maar ervaart men zelf vooral nadelen. Ook stijgende olieprijsen zijn geen automatische *trigger* voor de benodigde grote aanpassingen aan voertuigen en de overstap naar emissiearme energie. Bij stijgende olieprijsen worden niet alleen emissiearme energie, zoals zon- en windenergie, relatief goedkoper, maar dit geldt ook voor onconventionele oliebronnen⁴⁹, die over het algemeen juist meer CO₂-emissies veroorzaken dan conventionele olie.

Sterke technische ontwikkeling nodig, met name met het oog op kostenverlaging
De potentie van alternatieve voertuigen en emissiearme energiedragers is op papier zeer groot, maar ze zijn nog zo duur dat - nog afgezien van een mogelijk beperkt maatschappelijk draagvlak - grootschalige implementatie ver weg is. Er is hoe dan ook een sterke kostenreductie noodzakelijk. Om dit te bereiken zullen zowel grote *research*-inspanningen als opschaling van de techniek naar grotere productievolumes nodig zijn. Dit vergt grote (*up-front*) investeringen bij de autoindustrie en energiesector.

Niet alléén vertrouwen op techniek(ontwikkeling)

Ook al laat de analyse in hoofdstuk 8 zien dat een sterke CO₂-reductie in principe mogelijk is door uitsluitend inzet van techniek op het gebied van voertuigen en emissiearme energie, vanwege de grote onzekerheid of de techniek zich (kostentechnisch) daadwerkelijk voorspoedig ontwikkelt, lijkt het verstandig om ook beleid te ontwikkelen waarmee het potentieel van de niet-technische opties op het gebied van kilometerreductie wordt benut.⁵⁰ Daarnaast is het rijden met emissiearme snelheid een optie waarvan het potentieel nu al – zonder verdere technische ontwikkeling - kan worden verzilverd, bijvoorbeeld door verlaging van de wettelijke maximumsnelheid op snelwegen.

Maatschappelijk draagvlak voor alternatieve voertuigen en energiedragers nodig

Draagvlak voor alternatieve voertuigen en energiedragers is geen vanzelfsprekendheid. Het is een uitdaging om voertuigen en energiedragers aan de man te brengen die minder kunnen en ook nog eens duurder zijn dan de technologie die ze vervangen.

Routes naar alle energiedragers (biobrandstof, elektriciteit, waterstof, andere) openlaten

Alternatieve energiedragers spelen een belangrijke rol in het bereiken van een emissiearm en olieonafhankelijk wegverkeerssysteem. Er is nu nog niet (en mogelijk nooit) één winnende energievorm voor een duurzaam wegverkeerssysteem aan te wijzen. Veel is nog onzeker en onduidelijk, ook qua kosten en maatschappelijk draagvlak. Biobrandstof, elektriciteit en waterstof hebben elk potentie en hun eigen toepassingsgebied. Voor (langeafstands)vrachtverkeer lijkt de keuze sowieso beperkt tot biobrandstof. Daarnaast komen er in de toekomst mogelijk nog andere brandstof- en energiedragers beschikbaar, die nu nog niet bekend zijn.

⁴⁹ Bijvoorbeeld zandolie, *coal-to-liquids*, *gas-to-liquids*, *extra-heavy oil* en schalieolie (IEA, 2010).

⁵⁰ Zie bijvoorbeeld ook Banister (2009).

10.2 Welke actoren zijn betrokken?

Betrokkenheid overheid cruciaal om grote emissiereductie te kunnen bereiken
Gezien het ontbreken van automatische *drivers* voor het bereiken van een zeer grote emissiereductie, ligt een betrokkenheid van de overheid voor de hand.

Betrokkenheid van nieuwe actoren nodig

Om een emissiearm wegverkeerssysteem te realiseren is actie van zeer veel partijen nodig, met een diversiteit die veel groter is dan tot nu toe gebruikelijk voor het verlagen van emissies van het wegverkeer. Naast de 'traditionele' actoren, zoals autofabrikanten en oliemaatschappijen, is een belangrijke rol weggelegd voor de energiesector. Deze moet (door gericht beleid) gestimuleerd worden om te zorgen voor productie van emissiearme energiedragers, zoals biobrandstof van de tweede generatie en emissiearm geproduceerde elektriciteit en waterstof.

Betrokkenheid van verschillende beleidsniveaus cruciaal: EU, nationaal, regionaal
Gezien de schaalgrootte en de betrokken actoren (autosector, energiesector) is voor zuinige en alternatieve voertuigen en brandstoffen overheidsbeleid op Europees niveau cruciaal. Voor het realiseren van het potentieel op het gebied van voertuigkilometerreductie ligt vooral beleid van de nationale en regionale overheden voor de hand. Zie onderstaande tabel voor mogelijke beleidsinstrumenten per beleidsniveau.

Tabel 10.1

Voorbeelden van mogelijke beleidsinstrumenten bij de vier oplossingsrichtingen, per beleidsniveau

Oplossingsrichting	Gemeente, provincie	Rijk	EU
KILOMETER	Investeren in openbaar vervoer, beprijzen (tol), RO-beleid, parkeerbeleid	Investeren in openbaar vervoer, prijsmaatregelen, fiscale voordelen thuiswerken, RO-beleid	Modal shift beleid, prijsmaatregelen (eurovignet etc.)
VOERTUIG	Milieuzones, maximumsnelheid wegen	Subsidie, belasting, accijns, maximumsnelheid snelwegen, verplichte snelheidsbegrenzer	Voertuignormering (CO ₂), harmonisatie snelhedenbeleid, standaardisatie ITS
ENERGIE	Aanbesteding tankstations	Brandstofaccijns, subsidie, verplichting duurzame energie, aanbesteding tankstations (rijkswegen)	CO ₂ -beprijzing, bijvoorbeeld ETS (CO ₂ -emissiehandel) ⁵¹ , normering biobrandstoffen, verplichting duurzame energie
FILTER	Milieuzones	Subsidie	Voertuignormering (NO _x , PM ₁₀)

⁵¹ Dit bestaat nu al voor de Europese grote industrie, waaronder elektriciteitsproductiebedrijven. Door uitgifte van uitstootrechten te beperken, wordt de broeikasgasuitstoot van deze bedrijven gelimiteerd. Elektriciteit die wordt gebruikt in elektrische voertuigen valt hier automatisch onder. Denkbaar is bijvoorbeeld om dit instrument uit te breiden naar voertuigbrandstoffen (bijvoorbeeld op het niveau van de oliemaatschappijen).

10.3 Wanneer is betrokkenheid nodig?

Tijdig beleid nodig

Voor een grote emissiereductie in 2050 is een tijdige inzet van beleidsinstrumenten nodig, zodat emissiearme(re) technieken tijdig worden ontwikkeld en ingezet. *Lock-ins* van bestaande technologie moeten worden voorkomen. 2050 lijkt ver weg, maar de praktijk leert dat het lang duurt voordat een nieuw voertuigtype voor 100 procent is gepenetreerd (Pridmore, 2010): eerst is er een jarenlange ontwikkeltijd, dan introductie bij *early adopters* en vervolgens pas grootschalige verkoop aan de modale autorijder. Specifieke onderdelen van elektrische auto's en brandstofcelvoertuigen vergen nog aanzienlijke ontwikkeltijd, met name de accu's en brandstofcellen. De energiesector kent zelfs nog langere doorlooptijden: de bouwtijd van een gemiddelde energiecentrale bedraagt een aantal jaar en de centrale blijft daarna minstens 25 jaar staan. Tweede generatie biobrandstoffen vergen nog een aanzienlijke *research*-inspanning.

Ook het tot stand brengen van kilometerreductie vergt tijd, al is de doorlooptijd van de verschillende opties zeer verschillend. Veel tijd is gemoeid met een *modal shift* als deze via aanleg van nieuwe ov-infrastructuur tot stand komt en met verdichting van stedelijke gebied (bijvoorbeeld via ruimtelijke ordeningsbeleid). Een beleidsactie die relatief snel voor een beperking van de mobiliteitsbehoefte zorgt (ten opzichte van de referentiesituatie), is het invoeren van prijsmaatregelen die zorgen voor een hogere kilometerprijs.

10.4 Hoe zijn technische opties te realiseren?

Noodzaak van creëren business case en zekerheid bij marktpartijen

De autosector en energiesector kunnen met de ontwikkeling van nieuwe voertuigen en energiedragers aanzienlijke financiële risico's lopen. Er zijn grote investeringen nodig zowel in de energiesector als in de auto-industrie. De kost gaat hier voor de baat uit. Verder zal het voor de auto-industrie sowieso moeilijk worden om een voertuig aan de man te brengen dat minder kan en ook nog eens duurder is dan de technologie die het vervangt. Autofabrikanten en energiebedrijven zullen de noodzakelijke stappen pas nemen, als ze de verwachting hebben dat de alternatieve voertuigen en energiedragers de concurrentie aankunnen met de conventionele voertuigen met verbrandingsmotor en benzine en diesel.

Realisatie van het technisch potentieel hangt sterk af van het gevoerde beleid

Het hangt sterk af van het gevoerde beleid en ingezette beleidsinstrumenten, of de technische opties voor emissiereductie kunnen worden gerealiseerd. Vanzelf gaat het niet. De kosten om emissiearm wegverkeer te bereiken zijn hoger dan de kosten in de referentiesituatie. De emissiearme voertuigen en energiedragers zullen mogelijk zelfs na sterke kostendaling (door technische ontwikkeling) duurder blijven dan de conventionele vervuilende technieken. Door als overheid te sturen op emissies, bijvoorbeeld via emissienormering of -beprijzing, kan ervoor gezorgd worden dat de emissiearme technieken kunnen concurreren met de conventionele technieken, zonder dat de overheid een techniekkeuze maakt. Alle opties blijven dus open. In tabel 10.1 staan enkele voorbeelden van mogelijke beleidsinstrumenten, ingedeeld naar beleidsniveau.

Meer dan alleen voertuignormering (tank-to-wheel) nodig

De traditionele CO₂-normering voor personenauto's⁵² is gericht op de uitstoot op voertuigniveau, dat wil zeggen uit de uitlaat (*tank-to-wheel*). De voertuigfabrikant moet zorgen dat de voertuigen die hij verkoopt gemiddeld aan deze norm voldoen. Bij een toekomstig emissielooos vervoerssysteem (voertuigen op elektriciteit of waterstof) is een norm voor alleen de uitlaatemissies onvoldoende. Daarmee mist men immers de emissies die *well-to-tank* worden uitgestoten bij de productie van elektriciteit en waterstof.⁵³ Bovendien krijgen fabrikanten van elektrische en brandstofcelvoertuigen binnen het huidige systeem geen prikkel om het voertuig energiezuiniger te maken – zodat er per gereden kilometer minder elektriciteit of waterstof nodig is – , want hun score is nu al maximaal. Voor vrachtwagens bestaat er sowieso nog geen CO₂-normering, maar alleen normering voor luchtvervuilende stoffen (de Euronormen).

Testcyclus voor wettelijk vastgestelde emissie-eisen voor verbetering vatbaar

De emissie-eisen voor voertuigen hebben in de praktijk vaak veel minder effect dan mogelijk is, doordat de (wettelijk vastgestelde) testcyclus niet goed overeenkomt met de praktijk. Dit behoeft verbetering.

⁵² Verordening (EG) Nr. 443/2009.

⁵³ Wel valt de productie van elektriciteit en waterstof bij de energiesector en de industrie onder het Europese emissiehandelssysteem (ETS), waardoor CO₂-emissies in principe begrensd zijn. Het ETS heeft een looptijd tot 2020.

Summary

Emissions of CO₂ and atmospheric pollutants from road transport can be considerably reduced by 2050 using currently known technologies, while at the same time making road transport much less dependent on oil. A 60 to 80 per cent reduction in CO₂ emissions from 1990 levels is possible. Emissions of atmospheric pollutants (NO_x, PM₁₀) are already being considerably reduced by current policies, but further reductions are possible. The main options for doing this are the introduction of alternative vehicle types, such as electric and fuel cell vehicles, and energy carriers that generate little CO₂ and atmospheric pollution, such as electricity and hydrogen. Another way to reduce emissions is to curb the demand for mobility. Possibilities include better freight transport logistics, a higher price per kilometre travelled by road transport, switching from road transport to other means of transport (modal shift) and more home working. At the same time, this will improve traffic flows and road safety.

Alternative vehicle types, low-emission energy and a lower demand for mobility will not come automatically. Government intervention will be needed. In any case, alternative vehicle and energy carrier technologies will have to undergo considerable further development to reduce costs. But even if costs are significantly reduced, these technologies may remain more expensive than the current more polluting technologies. However, if low-emission technologies are to be widely adopted, they must be competitive with the (cheaper) more polluting technologies. This is feasible if the government pursues an emissions reduction policy, for example by setting standards or through emissions pricing. This would allow market participants to make their own technological choices, which is sensible because at the moment we do not know which low-emission techniques will prove to be most cost-effective and enjoy broad public support. The long development and lead times of low-emission technologies mean that policy instruments must be put in place quickly if major emissions reductions are to be achieved by 2050.

The Ministry of Infrastructure and the Environment asked the Netherlands Institute for Transport Policy Analysis (KiM) to investigate concrete options for ensuring that by 2050 road transport emissions of greenhouse gases (CO₂) and atmospheric pollutants (NO_x and PM₁₀, or fine particulates) are considerably lower and road transport is much less dependent on oil. A second question concerns the conditions needed to achieve this and the effects on road safety and traffic flows. For CO₂, a target was chosen of a 60 to 80 per cent emissions reduction in 2050 compared with 1990. The Climate and Air Quality Department of the Directorate-General for the Environment will use the results of this study in the preparation of a 'Climate 2050 Roadmap' for achieving the CO₂ emissions reduction by 2050 and any follow-up actions.

KiM carried out this study through a combination of a quick scan of the existing literature, interviews with research institutes and its own analysis. Given the distant time horizon and the uncertainties that go with this, we looked at the order of

magnitude of emissions reductions and the costs involved, and at the global effects on traffic flows and road safety. The effects were compared with a reference situation: an estimate of the situation in 2050 based on a continuation of current policies and existing trends.

Four strategies

Most CO₂, NO_x and PM₁₀ emissions have a common origin. All three are combustion emissions and arise from the combustion of oil (or other fuels). This means that there are many opportunities to reduce these emissions and oil dependence at the same time. We identified four possible strategies for doing this:

1. **KILOMETRES:** reducing the number of kilometres travelled. The options are home working, electronic shopping and conferencing (facilitated by the use of ICT), a shift from road vehicles to other forms of transport (modal shift), improved freight transport logistics, compact cities and a higher price per kilometre travelled.
2. **VEHICLE:** modifying vehicles and adjusting speeds to make driving more energy efficient. The options are fuel-efficient engines, lightweight and smart vehicles, low-emission driving speeds, and electric and fuel cell vehicles.
3. **ENERGY:** using alternative energy carriers that cause fewer emissions per unit of energy consumed by the vehicle as alternatives to petrol and diesel. Options are biofuels and low-emission electricity and hydrogen.
4. **FILTER:** filtering or cleaning vehicle exhaust gases to prevent them entering the environment (end-of-pipe). Options are particulate filters, catalytic converters and exhaust gas recirculation.

The first strategy is non-technical, although technology can play a facilitating role. The second, third and fourth strategies are mainly technical in nature.

Using alternative energy carriers offers the best prospects

The study resulted in the following findings:

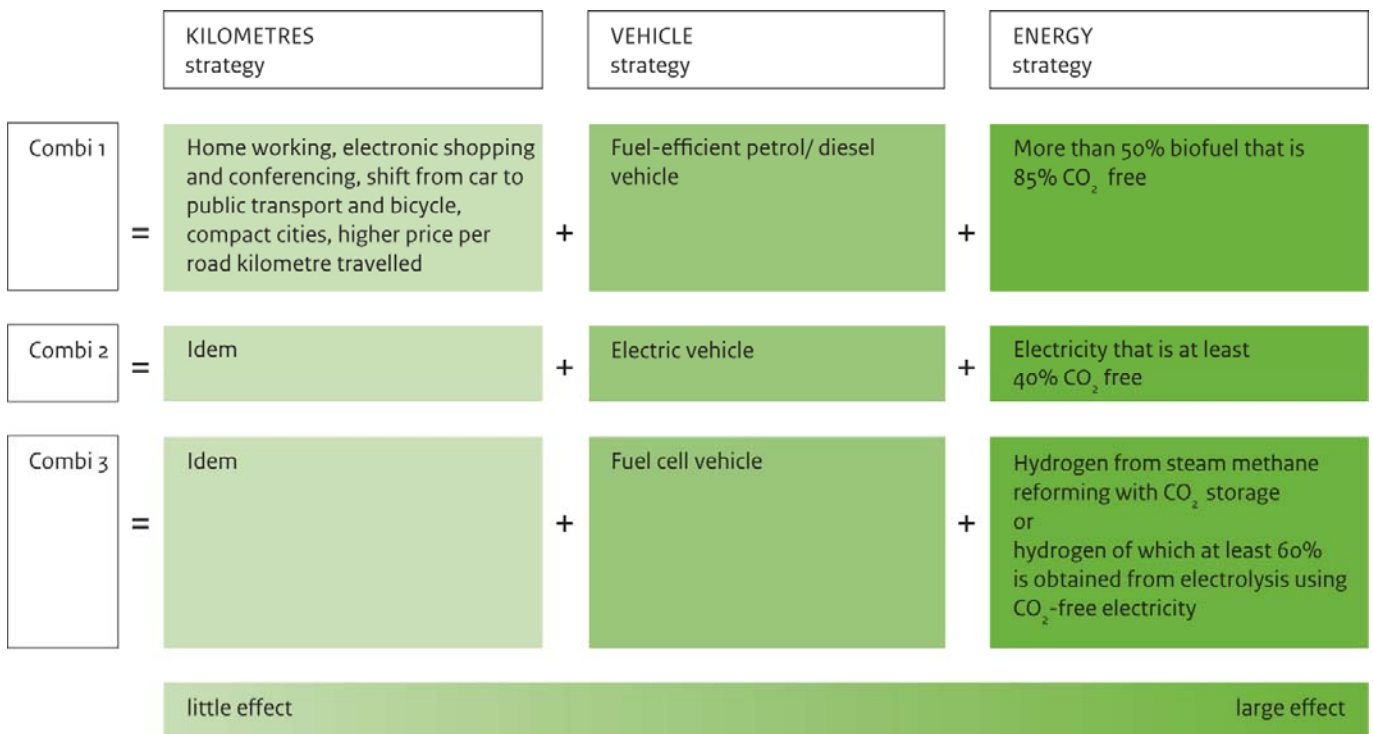
- Alternative energy carriers offer the most possibilities for reducing emissions and oil dependency, followed by more energy-efficient driving by modifying vehicles and adjusting driving speeds. Reducing the number of kilometres travelled offers the least prospect of reducing emissions.
- There are many methods of cleaning or filtering vehicle exhaust gases that reduce emissions of NO_x and PM₁₀. The options we found in the literature are already the subject of current policy and so any additional emissions reductions would be limited.
- Reducing the number of kilometres travelled, and to a lesser extent adjusting driving speeds, can have a positive effect on traffic flows and road safety; introducing alternative energy carriers and cleaning exhaust gases have no influence on this.
- In all the strategies, the potential for reducing emissions and dependence on oil are greater or much greater for private cars than for goods vehicles. This is because electric and fuel cell vehicles are less suitable for goods transport. This therefore also excludes the possibility of using low-emission electricity and low-emission hydrogen as energy carriers, which offer considerable prospects for reducing emissions and oil dependence.

Reducing CO₂ emissions by 60 to 80 per cent from 1990 levels is theoretically achievable

For private cars it is potentially possible to meet the 60 to 80 per cent CO₂ emissions reduction target by 2050 with each of the following combinations of options from the KILOMETRES, VEHICLE and ENERGY strategies:

Figure S.1

Combinations of options for private cars with which the CO₂ target of a 60–80% emissions reduction by 2050 can be met

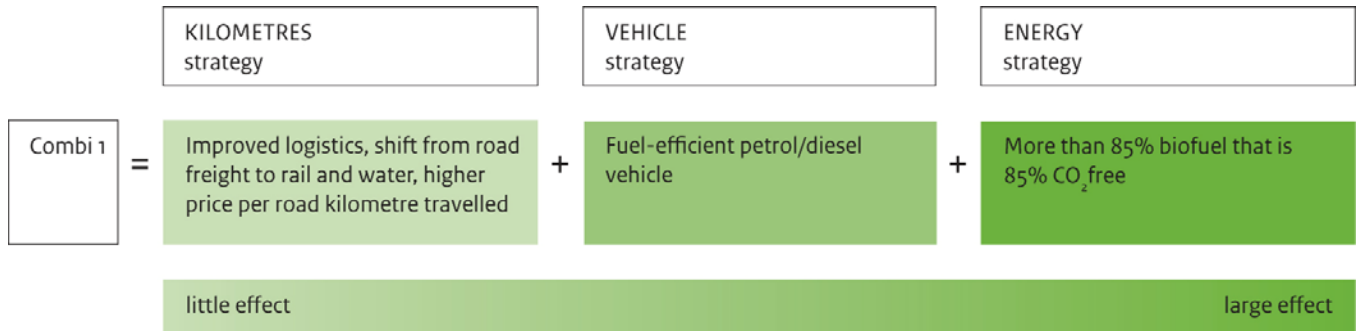


The CO₂ target can also be achieved without using the KILOMETRES strategy as long as the percentages in the last column are raised by a few percentage points.

For goods vehicles, the CO₂ target of a 60–80% emissions reduction by 2050 is in theory achievable with the following combination:

Figure S.2

Combination of options for goods vehicles with which the CO₂ target of a 60–80% emissions reduction by 2050 can be met



The CO₂ target for goods vehicles can be achieved without making use of the KILOMETRE strategy if all fuel used consists of 100% biofuel.

Costs and public support are potential obstacles

The main constraints and obstacles to realising the potential of the four strategies are:

- Higher costs: Low-emission road transport in 2050 will be more expensive than road transport in the reference situation. The alternative vehicles and energy carriers are more expensive than conventional petrol and diesel vehicles, which are the products of a long period of development. This difference in cost may remain in future. The options for reducing the number of kilometres travelled, such as a modal shift and compact cities, may also be more expensive.
- Uncertainties about technological developments: Reducing the current high costs of low-emission vehicles and energy carriers will require considerable technological advances. It is not certain that these will occur. A chicken and egg situation could arise in which costs will only fall when there is a large market for the technology (in other words, through economies of scale).
- Lack of public support. In themselves, the alternative vehicles and energy carriers deliver no added value to users over traditional petrol or diesel vehicles, and sometimes even a decline in comfort. The options for reducing the number of kilometres travelled are also generally not very popular.
- A possible constraint on the use of biofuels is the limited availability of biomass. Biomass production for the manufacture of biofuels competes with other crops for land, nutrients and water, and the use of biomass as a source of energy involves competition between sectors.

What is needed to realise the theoretical possibilities?

Sustainable road transport will not come about by itself. An essential condition for achieving a major reduction in road traffic emissions is a significant level of government intervention. Large number of actors will have to be mobilised. For the development of low-emission technologies, these will mainly be from the automobile industry and the energy sector. A scarcity of oil is not expected to be

the main driver of emissions reduction: many unconventional sources of oil are available, such as oil from natural gas or coal, and these will become economic as oil prices rise. It is therefore by no means obvious that as conventional oil reserves become depleted a transition will be made to sustainable, low-emission energy carriers.

At the moment it is not yet clear which low-emission technologies will eventually 'win', in other words which ones will perform best on costs and public acceptance. There may be no outright winner, with each technology having its own specific area of application. It would therefore be sensible for the government to keep all the available technological options open. If low-emission technologies are to be introduced on a large scale, they must be able to compete with (probably cheaper) polluting technologies, such as conventional petrol and diesel vehicles. This is feasible if the government pursues a low emissions policy, for example by setting emission standards or through emissions pricing. This would keep all the options open: the government would not be making any technological choices and market participants would choose the technology that is most economical or advantageous to them. Because of the uncertainties about whether low-emission technologies will become mature enough for widespread use, it is sensible also to pursue the option of reducing demand for mobility (driving less).

Policy measures should be put in place quickly because it will be a long time before new technologies or options for reducing the number of kilometres travelled are mature enough to be implemented on a large scale. This will involve a fundamental change from the present situation, which cannot be effected quickly. The most appropriate scale for developing new types of vehicle and low-emission energy carriers is Europe-wide, and so policies will be needed at the European level. For reducing the number of kilometres travelled, policies at the national and regional scales are the obvious choice.

Literatuur

Ammerlaan, H., Driever, J.P. & Kampen, L.T.B. van (2003). *Optiedocument duurzaam veilig voertuig, final report with factsheets (in annex)*. Rotterdam: Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer.

AVV (2004). *Perspectief op auto en OV*. Rotterdam: Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV).

Baanders, A. et al (1993). *Hoe kan dat nou?* Rotterdam: Rijkswaterstaat, Adviesdienst Verkeer en Vervoer.

Baanders, A. et al (2010). *Substitutiemogelijkheden tussen auto en openbaar vervoer: een terugblik na bijna twintig jaar*. In: Tijdschrift Vervoerswetenschap, jaargang 2010, nummer 3.

Baker, H. et al (2010). *Review of Low Carbon Technologies for Heavy Goods Vehicles*. Cambridge: Ricardo UK.

Banister, D. (2009). *Getting in the Right Lane. Low Carbon European Transport Beyond 2050*. Oxford: School of Geography and the Environment, Oxford University.

Bart, I. (2009). *Does sprawl cause the growth of transport CO₂?* Fifth Urban Research Symposium, Marseille 2009.

Barth, M. & Boriboonsomsin, K. (2010). *Traffic Congestion and Greenhouse Gases*. In: TR News 268, mei-juni 2010.

Bates, J., Brand, C., Davison, P. & Hill, N. (2001). *Economic evaluation of sectoral emission reduction objectives for climate change. Economic evaluation of emissions reductions in the transport sector of the EU. Bottom-up analysis. UPDATED*. Oxford: AEA Technology Environment.

Bijlsma, M., Janssen, R. & Vos, H. de (2010). *Eindrapportage Survey E-werken en mobiliteit*. Enschede: Novay.

Biofrac (2006). *Biofuels in the European Union. A vision for 2030 and beyond. Final report of the Biofuels Research Advisory Council*. Brussel: The Biofuels Research Advisory Council.

Blauw Research (2010). *Slim werken = Slim reizen = Slim Werkgeverschap: Resultaten onderzoek onder werknemers*. Rotterdam: Blauw Research.

Boer, E.C. den, & Vermeulen, J.P.L. (2004). *Snelheid en milieu*. Delft: CE Delft.

Boer, E.C. den, Otten, M. & Essen, H. van (2011). *STREAM International Freight 2011. Comparison of various transport modes on a EU scale with the STREAM database*. Delft: CE Delft.

Bovag (?). *(Brand)stof tot nadenken*. Amsterdam: Stichting BOVAG-RAI Mobiliteit.

Bovag (2008). *(Brand)stof tot nadenken II*. Amsterdam: Stichting BOVAG-RAI Mobiliteit.

Brink, R.M.M. van den & Annema, J.A. (2007). *Kosteneffectiviteit CO₂-beleid personenauto's. Methodische verkenning*. Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau.

Coevering, P. van de, Zaaijer, L., Nabielek, K. & Snellen, D. (2008). *Parkeerproblemen in woongebieden. Oplossingen voor de toekomst*. Bilthoven: Planbureau voor de Leefomgeving.

Crowther, J. (2009). *From transporting to connecting people: Strategic opportunities for Airlines in a connected world*. Presentatie bij Airneth seminar 'Videoconferencing, changing behaviour of business travellers and its effects on the aviation market', 14 October 2010, Den Haag. www.airneth.nl

Dieleman, F. & S. Musterd (ed) (1999). *Voorbij de compacte stad?* Assen: Van Gorcum.

Dings, J.M.W. & Klimbie, P.B. (2000). *Inzet van langere en/of zwaardere vrachtauto's in het intermodaal vervoer in Nederland; effecten op de uitstoot van CO₂ en NO_x*. Delft: CE Delft.

DVS (2010). *Langere en Zwaardere Vrachtauto's in Nederland. Kennis en ervaringen over de periode 1995-2010*. Delft: Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart.

E4tech (2007). *A review of the UK innovation system for low carbon road transport technologies. A report for the Department for Transport*. London: E4tech.

EC (2011). *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. COM(2011) 112 final. Brussel: Europese Commissie.

EC (2011a). *Impact assessment van 'A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050'*. SEC(2011) 288 final. Brussel: Europese Commissie.

EC (2011b). *White Paper. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. COM(2011) 144 final. Brussel: Europese Commissie.

EC (2011c). *Commission staff working document accompanying the White Paper - Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. SEC(2011) 391 final. Brussel: Europese Commissie.

ECF (2009). *Roadmap 2050. A practical guide to a prosperous, low-carbon Europe. Technical analysis, executive summary*. European Climate Foundation (ECF).

Daniëls, B. & Kruitwagen, S. (2010). *Referentieraming energie en emissies 2010-2020*. Petten/Bilthoven: ECN/PBL.

Essen, H. van & Kampman, B. (compilage) (2011). *Impacts of Electric Vehicles - Summary report*. Delft: CE Delft.

EUCAR, JRC & CONCAWE (2007). *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. TANK-to-WHEELS Report Version 2c, March 2007*. EUCAR, CONCAWE & JRC.

EUCAR, JRC & CONCAWE (2008). *Description and detailed energy and GHG balance of individual pathways, WTT APPENDIX 2 bij WELL-TO-TANK Report version 3.0 November 2008*. EUCAR, CONCAWE & JRC.

Francke, J., Annema, J. & Wouters, P. (2009). *Zuinig met goed op weg: beleid voor efficiencyverbetering in het goederenwegvervoer*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Frisblik (2009). *Onderzoek naar de succesfactoren van open Flexkantoren in Nederland*. Frisblik.

Fulton, L. (2010). *Demand and supply of renewable energy in future transport scenarios: range of options*. Presentatie bij 2010 ITF-KOTI Joint Seminar on Green Growth in Transportation, 25 november 2010. Parijs: IEA.

Geilenkirchen, G.P., Geurs, K.T., Essen, H.P. van, Schroten, A. & Boon, B. (2010). *Effecten van prijsbeleid in verkeer en vervoer. Kennisoverzicht*. Bilthoven/Delft: PBL en CE Delft.

Geurs, K.T., & Wee, B. van (2006). *Ex post Evaluation of Thirty Years of Compact Urban Development in the Netherlands*. In: *Urban Studies* 43(1): 139–60.

Gilbert, R. & Perl, A. (2008). *Transport Revolutions: Moving People and Freight without Oil*. London: Earthscan.

Gordijn, H. et al (2003). *De ongekende ruimte verkend*. Den Haag: Ruimtelijk Planbureau.

Goudappel Coffeng (2009). *Benchmark CO₂-emissies personenmobiliteit*. Deventer: Goudappel Coffeng.

Groot, W. (2007). *Geforceerde Modal Shift. Second opinion*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Hammingh, P. et al (ed.) (2010). *Co-impacts of climate policies on air polluting emissions in the Netherlands. Final report of the Dutch Research Programme on Air and Climate*. Bilthoven: Planbureau voor de Leefomgeving.

Hanschke, C.B., Uyterlinde, M.A., Kroon, P., Jeeninga, H. & Londo, H.M. (2009). *Duurzame innovatie in het wegverkeer. Een evaluatie van vier transitiepaden voor het thema Duurzame Mobiliteit*. Petten: ECN.

Hoofdbedrijfschap Detailhandel (2010). *Onderzoek Retail2020. Re'structure*. Den Haag: Hoofdbedrijfschap Detailhandel.

Hilbers, H., Thissen, M., Coevering, P. van de, Limtanakool, N. & Vernooij, F. (2007). *Beprijzing van het wegverkeer. De effecten op doorstroming, bereikbaarheid en de economie*. Den Haag: Ruimtelijk Planbureau.

Hilbers, H., Coevering, P. van de & Hoorn, A. van (2009). *Openbaar vervoer, ruimtelijke structuur en flankerend beleid: de effecten van beleidsstrategieën*. Bilthoven: Planbureau voor de Leefomgeving.

Hill, N., Hazeldine, T., Einem, J. von, Pridmore, A. & Wynn, D. (2009). *EU Transport GHG: Routes to 2050? Alternative Energy Carriers and Powertrains to Reduce GHG from Transport*. London: AEA.

Hill, N., Morris, M. & Skinner, I. (2010). *EU Transport GHG: Routes to 2050? SULTAN: Development of an Illustrative Scenarios Tool for Assessing Potential Impacts of Measures on EU Transport GHG. Task 9 Report VII*. Londen: AEA.

Hoën, A., Geurs, K., De Wilde, H., Hanschke, C. & Uytendinck, M. (2009). *CO₂ emission reduction in transport. Confronting medium-term and long-term options*. Bilthoven/Petten: PBL & ECN.

Hoën, A. et al (2010). *Verkeer en vervoer in de Referentieraming Energie en Emissies 2010-2020. Broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen*. Bilthoven/Petten: PBL & ECN.

IEA (2010). *World Energy Outlook 2010. Executive summary*. Parijs: International Energy Agency (IEA).

IenM (2011, 8 juni). *Brief van de staatssecretaris over de kabinetsaanpak klimaatbeleid op weg naar 2020 en de routekaart 2050*. Kamerstukken II, 2010-2011, 32 813, nr. 1.

IPM&ET (1996). *Op weg naar schoner transport. Integratieproject Milieu en economie in de transportsector (fase 1). Eindrapport*. Delft: CE, KNV en TLN.

Jabben, J. & Verheijen, E.N.G. (2010). *Effects of electric cars on traffic noise and safety*. Bilthoven: RIVM.

Kampen, L.T.B. van (2000). *De invloed van voertuigmassa, voertuigtype en type botsing op de ernst van letsel*. Leidschendam: SWOV.

Kampman, B. (2003). *Biomassa: tanken of stoken? Een vergelijking van inzet van biomassa in transportbrandstoffen of elektriciteitscentrales tot 2010*. Delft: CE Delft.

Kampman, B. (2004). *Mobiele steden. Een ruimtelijke verkenning van mobiliteit in de stedelijke regio*. Delft: CE Delft.

Kampman, B., Essen, H. van, Rooijen, T. van, Wilmink, I. & Tavasszy, L. (2009). *EU Transport GHG: Routes to 2050? Infrastructure and spatial policy, speed and traffic management (Paper 8)*. Delft: CE Delft en TNO.

KIM (2007). *Mobiliteitsbalans 2007*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KIM (2010). *Mobiliteitsbalans 2010*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

King, J. (2007). *The King Review of low-carbon cars. Part I: the potential for CO₂ reduction*. Londen: HM Treasury.

Knight, I. et al (2008). *Longer and/or Longer and Heavier Goods Vehicles (LHVs) - a Study of the Likely Effects if Permitted in the UK: Final Report*. Wokingham (UK): TRL.

Kouwenhoven, V.P. & Brienens, M. van (2005). *Up(2)Date e-werken: scenario's, praktijkcases en rekenmodel E-werken*. Diemen/Woerden: InHolland.

Krishnan, A. et al (2006). *Prediction of NO_x reduction with Exhaust Gas Recirculation using the Flame Temperature Correlation Technique*. Proceedings of the National Conference on Advances in Mechanical Engineering. 18-19 maart 2006, Kota, India.

Lensink, S.M. & Wilde, H.P.J. de (2007). *Kostenefficiëntie van (technische) opties voor zuiniger vrachtverkeer*. Petten: ECN.

Lewis, A. et al (2010). *Freight Consolidation Centre Study. Main Report*. London/Wokingham: Transport & Travel Research Ltd en TRL.

Martens, M.J., Horrevoets, M., Puylaert, H., Brummermans, A. & Broeke, A. van de (2002). *Omgevingsverkenner ICT, Ruimte en Mobiliteit*. Delft: TNO Inro.

McKinsey (2009). *Roads toward a low-carbon future: Reducing CO₂ emissions from passenger vehicle in the global road transportation system*. McKinsey & Company.

McKinsey (2010). *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*. McKinsey & Company.

Menkveld, M. (red) (2004). *Energietechnologieën in relatie tot transitiebeleid - Factsheets*. Petten: ECN.

Mensink, H.J.G. (2009). *Strategic Travel Management and Generation Y*. Presentatie bij Airneth seminar 'Videoconferencing, changing behaviour of business travellers and its effects on the aviation market', 14 October 2010, Den Haag. www.airneth.nl

MON (2009). *Mobiliteitsonderzoek Nederland 2009. Tabellenboek (datum 1 november 2010)*.

OECD/ITF (2010). *Moving freight with better trucks. Research Report. Summary Document*. Parijs: OECD/ITF.

Otten, M.B.J. & Essen, H.P. van (2009). *Langzamer is zuiniger: Verkenning van klimaatwinst van snelheidsverlaging op de snelweg*. Delft: CE Delft.

PBL (2007). *Nederland Later. Tweede Duurzaamheidsverkenning, deel Fysieke leefomgeving Nederland*. Bilthoven: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL (2009). *Getting into the Right Lane for 2050*. Bilthoven/Stockholm: PBL en Stockholm Resilience Centre Stockholm University.

PBL (2010). *Balans van de Leefomgeving 2010*. Bilthoven/Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL Compendium Leefomgeving. Geraadpleegd via <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0134-Koolstofdioxide-emissie-per-voertuigkilometer-voor-personenauto%27s.html?i=23-69>

Persson, M. (2011, 4 juni). Shell weet zwart goud uit gas te toveren. *Volkskrant*.

PRC (2007). *Nota Toekomstverkenning vrachtovervoer over de weg*. Rotterdam/Rijswijk: Policy Research Corporation & Nea.

PRC (2007a). *Onderzoek naar effecten van een geforceerde modal shift*. Antwerpen/Rotterdam: Policy Research Corporation (PRC).

Pridmore, A., Wynn, D., Hazeldine, T. & Milnes, R. (2010). *EU Transport GHG: Routes to 2050? An overview of factors that limit new technology and concepts in the transport sector (Task 9 Report IV)*. Londen: AEA.

Proost, S. & Dender, K. van (2010). *What sustainable road transport future? Trends and policy options. Discussion Paper No 2010-14*. Parijs: ITF/OECD.

Ruth, M. & Rong, F. (2006). Research Themes and Challenges. Part I, Chapter 2 in: Ruth, M. (ed.), *Smart Growth and Climate Change*. Edward Elgar Publishers.

Schermers, G. & Reurings, M. (2009). *Verkeersveiligheidseffecten van de invoering van Anders Betalen voor Mobiliteit*. Leidschendam: SWOV.

SenterNovem (2004). *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂-emissiefactoren*. Utrecht: SenterNovem.

Sharpe, R. & Smokers, R. (2009). *Assessment with respect to long term CO₂ emission targets for passenger cars and vans. Deliverable D2: Final Report*. AEA, Association Aspen, CE Delft & TNO & Öko-Institut.

Skinner, I., Essen, H. van, Smokers, R. & Hill, N. (2010). *EU Transport GHG: Routes to 2050? Towards the decarbonisation of the EU's transport sector by 2050*. Londen/Delft: AEA, CE Delft & TNO.

Stipdonk, H. & Reurings, M. (2010). *The safety effect of exchanging car mobility for bicycle mobility*. Leidschendam: SWOV.

Tavasszy, L. & Smokers, R. (2009). *Comments and suggestions wrt the papers and report chapter 5* [van PBL, Getting into the Right Lane for 2050] on transport, presented at the workshop in the Hague on May 18 2009. Delft: TNO B&O en TNO I&T.

TFL (2011). Website Transport for London:
<http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging/6733.aspx>

TNO (2005). *Diesel Emission Control: nabehandeling breekt door*. Artikel in TNO Magazine, december 2005.

TNS Nipo (2010). *Nederland klaar voor het nieuwe werken: onderzoek in het kader van de 'week van het nieuwe werken'*. Uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap en het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport. Amsterdam: TNS Nipo.

Verbeek, R. et al (2008). *Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles*. Eindhoven/Delft: TNO & CE.

Verhoef, E. et al (2004). *Vormgeving en effecten van prijsbeleid op de weg. Effectiviteit, Efficiëntie en Acceptatie vanuit een Multidisciplinair Perspectief*. Amsterdam/Groningen/Delft: Vrije Universiteit, SEO, RUG, TUDelft.

Vierth, I. et al (2008). *The effects of Long and Heavy Trucks on the transport system*. Linköping: VTI.

Visser, M., Smeets, W.L.M., Geilenkirchen, G.P. & Blom, W.F. (2008). *Effecten van de Euro-VI-emissie-eisen voor zwaar wegverkeer in Nederland*. Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau.

WBCSD (2004). *Mobility 2030: meeting the challenges to sustainability. The Sustainable Mobility Project. Full Report 2004*. Genève/Washington: World Business Council for Sustainable Development.

Weltevreden, J.W.J. (2007). *Winkelen in het Internettijdperk*. Den Haag: Ruimtelijk Planbureau.

Wilmink, I., Janssen, W., Jonkers, E., Malone, K., Noort, M. van, Klunder, G., Rämä, P., Sihvola, N., Kulmala, R., Schirokoff, A., Lind, G., Benz, T., Peters, H. & Schönebeck, S. (2008). *Impact Assessment of Intelligent Vehicle Safety Systems*. Delft: eIMPACT.

Bijlage A Referentiescenario

A.1 Inleiding

In deze bijlage gaan we nader in op het voor deze verkenning gebruikte referentiescenario voor de periode 2010-2050 en de bronnen waarop dit is gebaseerd. Het referentiescenario is een inschatting van de situatie bij voortzetting van het huidige, vastgestelde beleid, gekoppeld aan autonome trends, bijvoorbeeld op het gebied van transportvolume en ontwikkeling van het wagenpark. Dit wordt ook wel 'business-as-usual' (BAU) genoemd. We bekijken de ontwikkeling van de volgende parameters, die in opeenvolgende paragrafen aan bod komen:

- Voertuigkilometers (vkm), voor zowel personen- als vrachtauto's;
- Voertuigefficiency (MJ/vkm), voor zowel personen- als vrachtauto's;
- CO₂-intensiteit van conventionele transportbrandstof (CO₂/MJ);
- CO₂-intensiteit van elektriciteit (CO₂/kWh);
- NO_x- en PM₁₀-uitstoot van het wegverkeer;
- Olieafhankelijkheid van het wegverkeer.

In de literatuur is voor de Nederlandse transportsector geen referentiescenario voor de periode tot 2050 te vinden. De recente Referentieraming 2010-2020 van ECN en PBL (Daniëls, 2010) kijkt maar tot 2030. Ook de WLO-studie gaat maar tot 2030. Wel komen in de literatuur 2010-2050 referentiescenario's voor de EU voor, bijvoorbeeld in de Routes to 2050-studie. Deze laatste studie heeft data uit de EU-modellen TREMOVE en MARKAL-UD lineair geëxtrapoleerd naar 2050 (TREMOVE heeft ook 2030 als richtjaar) (RT2050, Sultan report, p.33 e.v.).

Vanwege het ontbreken van één dataset voor de periode 2010-2050, hebben we ervoor gekozen om voor de ontwikkeling van de voertuigkilometers de Nederlandse data voor de periode 2010-2030 uit (Daniëls, 2010) te koppelen aan de EU-data van (Hill, 2010) voor de periode 2030-2050. Bij de ontwikkeling van de voertuigefficiency (MJ/vkm) hebben we ons gebaseerd op de EU-data voor de periode 2010-2050 uit Hill (2010). Bij de ontwikkeling van de CO₂-intensiteit van conventionele transportbrandstoffen en elektriciteit zijn we uitgegaan van data hierover voor 2020 en hebben verondersteld dat de CO₂-intensiteit in de periode 2020-2050 constant blijft.

A.2 Voertuigkilometers (vkm)

Voor de ontwikkeling van de voertuigkilometers zijn we uitgegaan van onderstaande tabel.

Tabel A.1

Referentie
voertuigkilometers
(vkm) per type
voertuig, geïndexeerd
naar 2010

	1990	2010	2030	2050
personenauto's	78	100	119	134
Vrachtwagens	79	100	134	166

1990-2000

De volumegroei in de periode 1990-2000 is gebaseerd op CBS Statline.

2000-2030

Cijfers voor de periode 2000-2030 zijn gebaseerd op Hoen (2010). Daaruit zijn de gegevens gebruikt voor het Nederlandse transportvolume (inclusief buitenlandse voertuigen die in Nederland rijden), uitgesplitst naar voertuigtypen, volgens het scenario 'RR2010-V' (V=vastgesteld beleid).

In deze studie wordt één referentiescenario gebruikt (dus niet vier, zoals in de WLO-studie): het gaat om het 'waarschijnlijkste' middenpad (Hoen, 2010, p.9).

2030-2050

Hoen 2010 loopt maar tot 2030. Voor de periode 2030-2050 hebben we een extrapolatie gemaakt op basis van de transportvolumegroei (vkm) die wordt gehanteerd in Skinner (2010); de data zijn te vinden in de bijbehorende spreadsheet.⁵⁴ Dit groeipad is op zijn beurt afgeleid uit het Europese TREMOVE model (zie toelichting in Hill, 2010, p.33). Er wordt niet gedifferentieerd naar de verschillende lidstaten; het gaat om een Europees gemiddelde.

Afweging

In plaats van een combinatie te maken tussen de 'Nederlandse' data voor 2000-2030 (Hoen 2010) en de 'Europese' (EU) data voor 2030-2050, hadden we er vanwege de consistentie ook voor kunnen kiezen om voor de gehele periode 2010-2050 van de Europese dataset gebruik te maken. De groei van het aantal voertuigkilometers in de periode 2010-2050 zou dan meer dan 10 procentpunt hoger zijn uitgevallen (in 2050: 145 voor personenauto's en 180 voor vrachtauto's (2010=100)). Hier hebben we niet voor gekozen, omdat de EU-data een Europees gemiddelde betreffen. Extreme ontwikkelingen met volumegroei in nieuwe lidstaten zouden ervoor kunnen zorgen dat dit gemiddelde groeicijfer niet goed van toepassing is op de Nederlandse situatie. Voorzichtigheidshalve hebben we daarom pas voor de tweede helft van de periode 2010-2050 de EU-groeicijfers uit Skinner (2010) gebruikt.

A.3 Voertuigefficiëntie (MJ/vkm)

Voor de voertuigefficiëntie in het referentiescenario zijn we uitgegaan van onderstaande tabel.

Tabel A.2
Referentie
voertuigefficiëntie
(MJ/vkm) per type
voertuig, geïndexeerd
naar 2010

	2010	2030	2050
personenauto's	100	84	76
Vrachtwagens	100	91	83

Dit is gebaseerd op Hill (2010), p39, tabel 15. Daarin is rekening gehouden met het feit dat personenauto's in 2015 moeten voldoen aan een CO₂-norm van 130 g/km en bestelauto's vanaf 2016 aan een norm van 175 g/km, en er is gecorrigeerd voor het verschil tussen daadwerkelijke emissies en testcyclus. Ook is uitgegaan van een beperkt aandeel hybride auto's (een marktaandeel van nieuw verkochte auto's in 2050 van 6 procent).⁵⁵

⁵⁴ Sultan results viewer v3.1, blad "Individual scenario". Te downloaden via <http://www.eutransportghg2050.eu>

⁵⁵ Sultan Tool v4.3.xls, blad Scenario_editor, tabel "Split of new vehicle sales by powertrain"

A.4 CO₂-intensiteit transportbrandstof (CO₂/MJ)

Voor de CO₂-intensiteit van de brandstof in het referentiescenario zijn we uitgegaan van onderstaande tabel. Het gaat hier om de conventionele transportbrandstof zoals die in voertuigen met verbrandingsmotor wordt toegepast (diesel/benzine).

Tabel A.3

Referentie CO₂-intensiteit brandstof (CO₂/MJ) per type voertuig, geïndexeerd naar 2010

	2010	2030	2050
personenauto's	100	94	94
Vrachtwagens	100	94	94

Er is verondersteld dat, conform de Europese richtlijn brandstofkwaliteit⁵⁶, in 2020 6 procent CO₂-besparing plaatsvindt over de levenscyclus van de transportbrandstof en dat dit in de periode 2020-2050 constant blijft. De verplichting voor inzet van 10 procent duurzame energie in de transportsector in 2020 (op basis van de Europese richtlijn 2009/28/EG) is niet apart meegenomen, maar is verondersteld samen te vallen met de 6 procent CO₂-reductie die nodig is op basis van de richtlijn brandstofkwaliteit.⁵⁷

A.5 CO₂-intensiteit elektriciteit (CO₂/kWh)

Er is vanuit gegaan dat in de referentiesituatie in 2050 elektriciteit wordt geproduceerd met een gemiddelde CO₂-uitstoot van 335 g/kWh (op centraleniveau). Dit hebben we berekend op basis van gegevens over de uitstoot van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark in 2020 bij vastgesteld beleid (Daniëls, 2010).⁵⁸ We hebben aangenomen dat de CO₂-uitstoot per kilowattuur in de periode 2020-2050 constant blijft.

Hernieuwbare elektriciteit heeft in de referentiesituatie een aandeel van 14 procent in de elektriciteitsproductie⁵⁹, het aandeel van kernenergie is circa 4 procent. Ter vergelijking: op dit moment bedraagt het aandeel hernieuwbare elektriciteit circa 9 procent en het aandeel kernenergie 4 procent.

De CO₂-uitstoot van het deel van het Nederlandse elektriciteitsproductiepark dat op fossiele brandstoffen wordt gestookt (gas en kolen) is ca. 400 gram per kWh (af centrale).⁶⁰ Hieruit valt vervolgens af te leiden wat de CO₂-uitstoot per kWh is van elektriciteit die voor een bepaald percentage CO₂-loos is.

Bijvoorbeeld elektriciteit die 40 procent CO₂-loos is, heeft een CO₂-uitstoot per kWh van circa 240 gram (op centraleniveau), elektriciteit die 60 procent CO₂-loos is 160 gram.

We hebben verder gerekend met 7 procent transportverlies van elektriciteit tussen het opwekpunt van elektriciteit (af centrale) en het oplaadpunt van het voertuig.⁶¹

⁵⁶ 2009/30/EG.

⁵⁷ Het doel van 10 procent hernieuwbare energie is niet rechtstreeks te vertalen naar een bepaald percentage CO₂-reductie, omdat er verschillende rekenregels gelden voor verschillende soorten hernieuwbare energie. Zo telt bijvoorbeeld hernieuwbare elektriciteit (voor elektrisch transport) 2,5 keer mee, en tellen tweedegeneratiebiobrandstoffen dubbel.

⁵⁸ In het scenario met vastgesteld beleid (RR2010-V) is sprake van een jaarproductie in 2020 van 170 TWh elektriciteit (inclusief 20 TWh export), bij een CO₂-uitstoot van 57 Mton (Daniëls, 2010, p.71-72).

⁵⁹ Zie Daniëls, 2010, p.81.

⁶⁰ Dit is berekend door de totale CO₂-uitstoot in 2050 (57 Mton) te delen door de totale elektriciteitsproductie in Nederland in 2050 (170 TWh) minus de bijdrage van hernieuwbare energie (20 TWh) en kernenergie (5 TWh), dus 57/145 Mton CO₂/TWh.

⁶¹ Dit verliespercentage is o.a. gebaseerd op (E4tech, 2007).

A.6 NO_x- en PM₁₀-uitstoot van het wegverkeer

1990-2010

Tussen 1990 en 2010 zijn de NO_x-emissies van het wegverkeer zowel relatief (per kilometer) als absoluut gedaald (CBS Statline):

- de NO_x-emissie per voertuigkilometer is gedaald met 80 procent bij personenauto's en 50 procent bij vrachtauto's;
- de absolute NO_x-emissie van het wegverkeer is, ondanks een volumegroei van 30 procent, ruim 50 procent gedaald.

Ook de PM₁₀-emissie van het wegverkeer is in de periode 1990-2010 met ruim 50 procent gedaald, ondanks een volumegroei van 30 procent (CBS Statline).

De bijdrage van het wegverkeer aan de totale NO_x-emissies in Nederland bedraagt circa 60 procent (160 kton) (Daniëls, 2010, p.100 e.v.). De bijdrage van het wegverkeer aan de totale PM₁₀-uitstoot in Nederland bedraagt circa 25 procent (8 kton). Hierin is het aandeel van slijtageprocessen (banden, remmen, wegdek) ongeveer 30 procent, 70 procent is afkomstig van het verbrandingsproces in de motor. Verwacht wordt dat vanaf 2020 (vanwege schonere motoren) de verhouding andersom ligt (Daniëls, 2010, p.117 e.v.).

2010-2050

De NO_x- en PM₁₀-emissies *van de totale Europese transportsector* nemen in de referentiesituatie (*business-as-usual*) tussen 2010 en 2030 af met ongeveer 40 procent respectievelijk 50 procent, en zullen daarna ongeveer stabiliseren (EC, 2011c, p.15). Dit is onder andere het gevolg van het Europese beleid met Euronormen voor wegvoertuigen. Deze reductiepercentages worden in (EC, 2011c) niet verder uitgesplitst naar de verschillende modaliteiten, maar mogelijk dalen de NO_x- en PM₁₀-emissies van het wegverkeer zelfs nog meer dan met bovengenoemde percentages.

Bijvoorbeeld (Hanschke, 2009, p.31) schat in dat voor het Nederlandse wegverkeer de emissies van NO_x en PM₁₀ door de Euronormen tussen 2010 en 2050 met zo'n 75 procent zullen dalen. Ook de WBCSD (WBCSD, 2004, hoofdstuk 2, p.38) voorziet grote dalingen van de NO_x- en PM₁₀-uitstoot van het wegverkeer in geïndustrialiseerde landen.

A.7 Olieafhankelijkheid van het wegverkeer

De Europese transportsector is momenteel voor ongeveer 96 procent van haar energiebehoefte afhankelijk van olie en olieproducten. In het referentiescenario leveren olieproducten in 2030 nog steeds 90 procent van de energiebehoefte en in 2050 89 procent (EC, 2011c, p.12).

De IEA (2010) verwacht dat de olieprijs in 2035 is verdubbeld ten opzichte van 2009 (113 dollar versus 60 dollar per vat). De productiecapaciteit van conventionele ruwe olie zal de komende decennia (tot 2035) grofweg op het huidige niveau van 70 miljoen vaten per dag blijven. Doordat huidige productievelden minder gaan produceren, moeten daarvoor wel veel nieuwe velden in gebruik worden genomen. De productie van vloeibaar aardgas (LNG) en onconventionele oliebronnen, zoals Canadese teerzandolie, zal naar verwachting sterk gaan groeien.

Colofon

Dit is een uitgave van het
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

november 2011
Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)

ISBN: 978 90 8902 090 1
KiM-11-A10

Auteurs: Saeda Moorman, Maarten Kansen

Jan Anne Annema (TU Delft) willen we bedanken voor zijn *review* van een eerdere versie van deze publicatie. Daarnaast hebben we dankbaar gebruik gemaakt van de input die (in interviews) is geleverd door de volgende personen: Huib van Essen (CE Delft), Coen Hanschke (ECN), Anco Hoen (PBL), Marko Ludeking (RWS, DVS), Kees van Muiswinkel (RWS, DVS), Martine Uyterlinde (ECN) en Rob Weterings (TNO). Wij zijn hen zeer erkentelijk. De verantwoordelijkheid voor de inhoud en de conclusies van deze publicatie ligt uiteraard volledig bij het KiM.

Vormgeving en opmaak:
IenM

Opmaak figuren en grafieken:
Studio Guido van der Velden B.V., Rijswijk

Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM)
Postbus 20901
2500 EX Den Haag

Telefoon : 070 456 1965
Fax : 070 456 7576

Website : www.kimnet.nl
E-mail : info@kimnet.nl

Publicaties van het KiM zijn aan te vragen bij het KiM (via kimpublicaties@minienm.nl) of als PDF te downloaden van onze website www.kimnet.nl. U kunt natuurlijk ook altijd contact opnemen met één van onze medewerkers.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen onder vermelding van het KiM als bron.