

Stieltjesweg 1
Postbus 155
2600 AD Delft

www.tno.nl

T +31 15 269 20 00
F +31 15 269 21 11
info-lenT@tno.nl

TNO-rapport

MON-RPT-033-DTS-2008-02880

**Technologisch CO₂-reductie potentieel voor
transport in 2040**

Datum	22 september 2008
Auteur(s)	G.L.M. Passier J.P.M. Driever J. van Baalen D. Foster G. Kadijk R. Verbeek
Opdrachtgever	Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Projectnummer	033.20842
Aantal pagina's	47 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	6

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

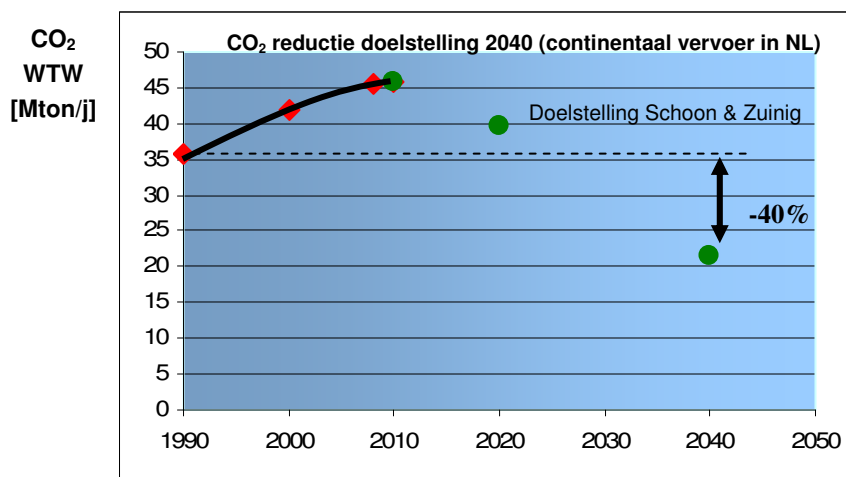
Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Samenvatting

In deze rapportage presenteert TNO de conclusies van haar studie naar een uitdagende, maar haalbare CO₂ reductiedoelstelling voor het continentaal vervoer in Nederland in 2040. Deze studie is verricht op verzoek van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Hoofdconclusie is dat voor het continentaal vervoer in Nederland een reductie van ca. 40% in de CO₂ uitstoot ten opzichte van 1990 mogelijk is door middel van technologische innovaties en toepassing van alternatieve energiebronnen.

Dit is ca. 50% reductie ten opzichte van 2000 (zie Figuur 1). Deze reducties betreffen de “well-to-wheels” CO₂ uitstoot. Dat wil zeggen dat de CO₂ prestaties van de gehele brandstofketen zijn meegenomen¹.



Figuur 1.1: CO₂ reductiedoelstelling voor 2040 voor continentaal vervoer in Nederland (well-to-wheels).

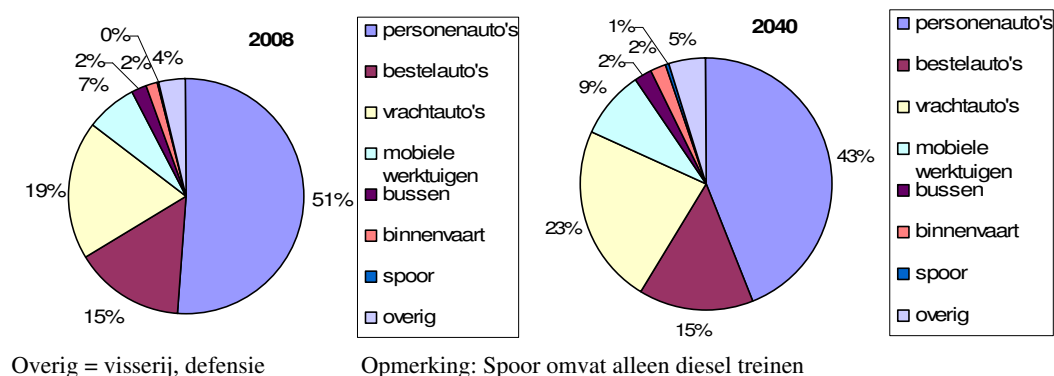
Minder CO₂ uitstoot gepaard aan grotere energiezekerheid

Naast het bereiken van de CO₂ reductiedoelstelling dragen de ontwikkelingen die ten grondslag liggen aan het bereiken van deze doelstelling bij aan een grotere energiezekerheid, doordat de afhankelijkheid van de traditionele (fossiele) brandstoffen voor voertuigen sterk verminderd wordt.

¹ Dit in tegenstelling tot Schoon & Zuinig en IPCC (Intergovernmental Platform for Climate Change) berekeningen, waar voor transport alleen naar de tank-to-wheels emissies wordt gekeken. De well-to-tank emissies worden daar namelijk meegenomen in de categorie ‘industrie’. Doordat sprake is van alternatieve energiebronnen (biobrandstoffen, elektriciteit, waterstof) is het noodzakelijk de gehele keten – van productie tot en met de toepassing in het voertuig – in ogenschouw te nemen.

Bijdragen van de verschillende vervoerssegmenten

Er zijn grote verschillen in de CO₂ uitstoot van de verschillende vervoerssegmenten (Figuur 2).



Figuur 2: Bijdrage (in procenten) van de verschillende vervoerssegmenten aan de totale CO₂-uitstoot voor 2008 en 2040.

Verreweg het grootste aandeel in de CO₂ uitstoot (51% nu en 43% in 2040) wordt geleverd door personenauto's. Daarnaast leveren bestelauto's en vrachtauto's een aanzienlijke bijdrage (34% nu en 38% in 2040). De overige categorieën leveren elk een beperkte bijdrage, maar bij elkaar toch nog een aanzienlijk aandeel (15% nu en 18% in 2040), zodat ook hier maatregelen gerechtvaardigd zijn.

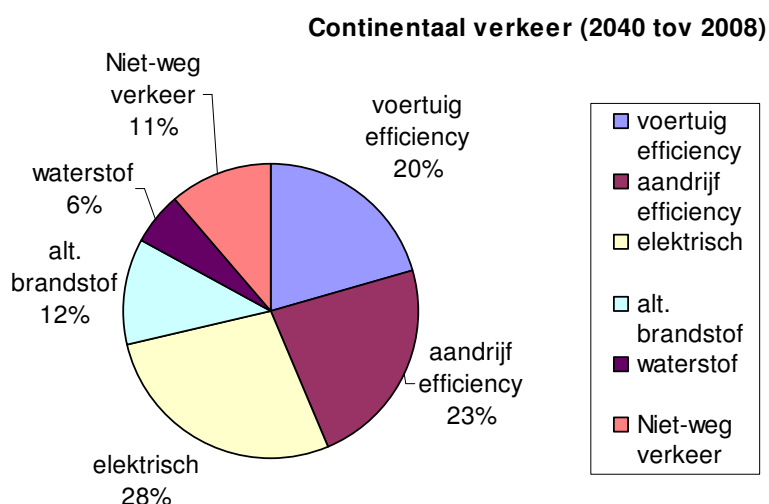
Bij de berekeningen is uitgegaan van een ontwikkeling van de vervoersprestatie (voertuigkilometers) conform het WLO scenario 'Global Economy (GE)', dat een relatief sterke groei van het aantal voertuigkilometers voorspelt.

De belangrijkste bouwstenen voor het bereiken van de 40% doelstelling zijn:

- Verdere verbetering van de efficiency van de verbrandingsmotor en aandrijving.
- Significante inzet van biobrandstoffen.
- Sterke ontwikkeling van elektriciteit als energiedrager via plug-in hybride en (deels) volledig elektrische voertuigen.
- Waterstof als energiedrager (voor personenauto's) speelt in deze prognose een beperkte rol.
- Efficiency verbeteringen aan het voertuig.

Per vervoerssegment is aangegeven welke CO₂ reductie mogelijk geacht wordt en welke technologische aangrijpingspunten daarvoor beschikbaar zijn of zullen komen. Gezien het relatief grote aandeel wordt daarbij de meeste aandacht gegeven aan personenauto's, bestelauto's en vrachtauto's.

Het rapport geeft technologische prognoses op basis van nu beschikbare kennis en feiten. Een andere verhouding tussen beschikbare technieken dan in dit rapport aangegeven kan ontstaan. Totdat is uitgekristalliseerd wat de 'winnende' technieken zijn is concurrentie goed. Het doel is niet om precies te voorspellen welke technieken in 2040 worden toegepast, maar om te onderbouwen dat een aanzienlijke CO₂ reductie in de transportsector mogelijk is.



Figuur 3: Bijdrage van de technologische opties aan CO₂ reductie van alle vervoerssegmenten (2040 t.o.v. 2008). Voor de grote segmenten (personenauto's, bestelauto's, vrachtauto's) is dit uitgesplitst naar bijdrage per technologie optie. Bijdrage van de kleinste segmenten (niet-wegverkeer) zijn niet gespecificeerd.

Rol van de overheid

Over het algemeen kost nieuwe, schone technologie extra geld en dat betekent dat de aangegeven CO₂ reductie alleen tot stand komt als er stevige beleidsmaatregelen worden genomen. Overigens dalen de meerkosten van nieuwe technologie bij grootschalige toepassing.

Europese beleidsmaatregelen zijn essentieel. Nederland kan hierin een stimulerende rol spelen. Daarnaast kunnen maatregelen in Nederland de technische ontwikkeling versnellen. De benodigde beleidsmaatregelen zijn in principe bekend en beschikbaar, soms zijn uitwerkingen of verbeteringen nodig.

De belangrijkste beleidsopties op Europees niveau zijn:

- Actief (verder) ontwikkelen van Europese wetgeving op het gebied van efficiëntie eisen aan personenauto's, bestelauto's, vrachtauto's, en ook binnenvaart en non-road voertuigen.
- Stellen van normen voor de brandstoffen op basis van de well-to-tank uitstoot, later eventueel voor de well-to-wheels uitstoot.
- Het ontwikkelen van prijsmechanismen, bijvoorbeeld gericht op het internaliseren van externe kosten. Denkbaar is ook het opzetten van een Europees systeem van emissiehandel voor de transportsector (voor goederenvervoer, dus gericht op vrachtauto's, mogelijk scheepvaart, treinen, niet op personenauto's en bestelauto's). Daarbij moet worden opgemerkt dat door elektrificeren van transport een deel van de transport CO₂ emissies "vanzelf" onder het ETS (European Trade System) zullen vallen.
- Geleidelijke verhoging van de Europese minimum niveaus voor de brandstofaccijnzen.

De belangrijkste beleidsopties op nationaal niveau zijn:

- Beprijzen in diverse vormen op nationaal niveau: financiële prikkels voor de aanschaf van CO₂ arme voertuigen en brandstoffen, zoals differentiatie van BPM, MRB, accijnzen en eventueel subsidies, inclusief een samenhangend pakket aan flankerende maatregelen.

- Diverse stimuleringsmaatregelen voor de ontwikkeling en implementatie van nieuwe technologie, inclusief bevordering van onderzoek en ontwikkeling van CO₂ arm transport en voorlichting aan consumenten en transporteurs over de mogelijkheden. Ook kan de overheid, naast industriële partijen, optreden als launching customer

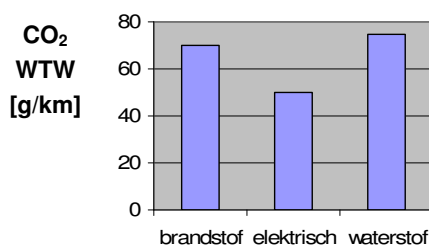
In het rapport is per vervoerssegment aangegeven wat de kritische succesfactoren cq. bottle-necks zijn en welke de belangrijkste beleidsopties zijn die de overheid beschikbaar heeft.

Robuust programma?

Bij het gepresenteerde plaatje voor 2040 moet worden opgemerkt dat dit niet hét toekomstscenario is dat met grote waarschijnlijkheid gerealiseerd gaat worden. Daarvoor zijn er teveel onzekerheden. Het moet gezien worden als een indicatie van wat technologisch haalbaar lijkt en biedt als zodanig aanknopingspunten voor beleidsmaatregelen.

Bij een “looptijd” van meer dan 30 jaar is het moeilijk een inschatting te geven van de robuustheid van het scenario. Wel is het zo dat de geschetste ontwikkelingen –voor personenauto’s- over een breed front in gang zijn gezet en de industrie forse investeringen doet in de benodigde technologieën. Vrij recent is dat voor elektrische voertuigen overtuigend duidelijk geworden.

Het vertrouwen in de robuustheid wordt versterkt doordat er in orde van grootte geen grote verschillen zijn in de geschatte CO₂ emissies van de verschillende energiedragers in 2040. Met andere woorden: onderlinge verschuivingen in deze mix hebben beperkte invloed op het eindresultaat. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 5, waarin te zien is dat het WTW CO₂ reductiepotentiëel van de 3 hoofdopties (motorbrandstof, elektriciteit en waterstof) in orde van grootte niet veel verschilt.



Figuur 5: *Vergelijking well-to-wheels CO₂ emissies in 2040 voor personenauto’s met verschillende energiedragers en bijbehorende aandrijving, op basis van de inschattingen/berekeningen die in deze studie gebruikt zijn.*

Kosten spelen een rol bij de acceptatie van nieuwe technologieën en de implementatiesnelheid ervan. Daarbij moet worden opgemerkt dat de meeste alternatieve technologieën relatief duur zijn in het begin van hun ontwikkelings- en implementatiefase, maar de ervaring leert dat bij productie op grote schaal (zoals in sterke mate het geval is bij personenauto’s) de kosten sterk dalen. Dit neemt niet weg dat voertuigen mogelijk duurder worden. Nauwlettend volgen en opstellen van prognoses voor de kostenontwikkelingen is nodig om tot een goede uitwerking van beleidsmaatregelen te komen.

Een belangrijke factor in het kosten-baten plaatje vormen de energiekosten. Continu hoge olieprijsen beperken mogelijk de mobiliteitsgroei en stimuleren zeker technologische vernieuwing. Over de ontwikkeling van de olieprijs en de mogelijke effecten daarvan bestaat onzekerheid. Hoge olieprijsen zullen het implementeren van beleidsmaatregelen vergemakkelijken. Geadviseerd wordt om dit goed te volgen en de implicaties voor de beleidsmaatregelen verder te verkennen.

De robuustheid wordt tenslotte in belangrijke mate bepaald door het consistent inzetten door de overheid op meerdere van de genoemde beleidsopties. Daarbij moet zeker ook het stimuleren van technologieontwikkeling en -implementatie –daar waar effectief– door middel van grootschalige demo's meegenomen worden. Dit is vaak nodig om de marktintroductie van nieuwe technologie te versnellen en biedt daarnaast kansen voor innovatieve bedrijven.

Kansen voor de BV Nederland

Nederland heeft een aanzienlijke ontwikkelings- en productiesector op het gebied van voertuigaandrijving en brandstoffen, met tal van grote en kleinere innovatieve bedrijven. De genoemde doelstelling biedt deze sector veel kansen, zeker indien dit gestimuleerd wordt door overheidsprogramma's, gericht op technologie ontwikkeling en implementatie. Met andere woorden: "Nederland als proeftuin" voor innovaties voor Mobiliteit en Milieu draagt bij aan het realiseren van de reductiedoelstelling, met een optimaal economisch voordeel van het bedrijfsleven. Hiervoor is het wel noodzakelijk dat de overheid, ook op de langere termijn, een stabiele partner is.

Samenvattende conclusies

- Door technologische innovaties is 40% CO₂ reductie ten opzichte van 1990 in het Nederlandse continentaal vervoer haalbaar.
- Het grootste aandeel wordt gerealiseerd bij personenauto's.
- De belangrijkste technologische opties zijn: efficiency vergroting van voertuig en aandrijving en elektriciteit als energiedrager.
- Beleidsmaatregelen om dit te bereiken zijn beschikbaar.
- De nieuwe technologieën zullen (extra) kosten met zich mee brengen, zeker in de aanloopfase.
- Deze doelstelling vergroot tevens de energiezekerheid en benut de innovatiekracht van Nederlandse bedrijven.

Tenslotte

Het bereiken van de CO₂ reductie is minder afhankelijk van technologische haalbaarheid dan van (politieke) wil en de bereidheid om de meerkosten te accepteren. Belangrijk is een duidelijke visie en een consistent (Europees en nationaal) beleid, zowel naar de bedrijven als naar de burger.

De hoofdboodschap dat we met innovatieve technieken "de klus kunnen klaren", zodat we aan mobiliteit weinig hoeven in te boeten, zal daarbij zeker helpen!

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	2
1	Inleiding.....	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstelling en werkwijze	8
1.3	Randvoorwaarden, uitgangspunten en aannames	9
1.4	Structuur van de rapportage	10
2	Mogelijke CO₂ reductie en technologie opties per voertuig categorie.....	11
2.1	Personenauto's: grootste reductie	11
2.2	Bestelauto's: bijdrage daalt ondanks sterke groei vervoersprestatie.....	13
2.3	Vrachtauto's: bijdrage daalt ondanks sterke groei vervoersprestatie.....	14
2.4	Overige categorieën: beperkte bijdrage maar ook hier mogelijkheden.....	15
3	Samenvattend overzicht CO₂ reductie doelstelling.....	16
4	Conclusies en discussie	22
4.1	Conclusies.....	22
4.2	Discussie.....	24
5	Literatuur	27
6	Ondertekening.....	28
	Bijlage(n)	
	A Personenauto's	
	B Bestelauto's en vrachtauto's (distributie en lange afstand)	
	C Bussen	
	D Binnenvaart	
	E Spoor (personen- en goederenvervoer)	
	F Overzicht Nederlandse bedrijven actief in de zuinige voertuigaandrijving	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In 2007 heeft het kabinet Balkenende IV het werkprogramma Schoon en Zuinig gelanceerd [Cramer 2007]. Hierin wordt beschreven hoe de overheid wil bijdragen aan het significant verminderen van de impact van transport op het milieu voor wat betreft brandstofverbruik en CO₂ emissies. In dit werkprogramma zijn de ambities voor 2020 verder uitgewerkt. De impact van de voorgestelde beleidsopties is door ECN uitgewerkt en door berekeningen onderbouwd (o.a. in [Uyterlinde 2008]).

In de Nota Mobiliteit (2006) was reeds aangegeven wat de beleidsdoelstellingen van het kabinet zijn, zowel voor deze kabinetsperiode als voor de periode tot 2020. Voortbouwend op de aannames en scenario's zoals geschetst in [Uyterlinde 2008], geeft deze studie een advies over wat een ambitieuze en realistische doelstelling zou kunnen zijn voor 2040.

Voor de studie was ca. 2 manmaanden beschikbaar. Gebruik is gemaakt van bij TNO aanwezige kennis en van gegevens uit de literatuur, aangevuld met inschattingen op basis van externe informatie en TNO expertise.

1.2 Doelstelling en werkwijze

Het doel van de studie is te verkennen welke CO₂ respectievelijk energie besparingsreductie voor het continentaal vervoer in Nederland in het jaar 2040 door middel van technologische innovaties realiseerbaar zou kunnen zijn. Hiervoor wordt uitgegaan van haalbare technologische innovaties bij de belangrijkste voertuigcategorieën in het weg- en railvervoer en bij binnenvaartschepen. Het rapport geeft een schets van de meest perspectiefrijke technologie opties, getoetst op de aspecten reductiepotentieel en technologische haalbaarheid cq. risico's. Tevens worden de belangrijkste beleidsopties aangegeven die nodig zijn om de genoemde technologische innovaties ook daadwerkelijk geïmplementeerd te krijgen.

Voor de studie zijn de diverse ontwikkelingen samengebracht in een vijftal technologische opties c.q. ontwikkelingspaden, die principieel verschillen:

- a. Verdere optimalisatie van de verbrandingsmotor en de aandrijflijn
- b. Inzet van biobrandstoffen
- c. Voeding met extern opgewekte elektriciteit
- d. Toepassing brandstofcel met waterstof als energiedrager
- e. Verdere optimalisatie van de voer-/vaartuig efficiency (parallel aan voorgaande 4)

Voor elk van de vastgestelde transportmiddelen worden de relevante opties verder uitgewerkt en worden de reducties bepaald:

- Personenauto's
- Bestelauto's
- Vrachtauto's (distributie en lange afstand)
- Bussen
- Schepen (binnenvaart)
- Treinen

Voor de CO₂ berekeningen is uitgegaan van een well-to-wheels (WTW) benadering, in tegenstelling tot CO₂ berekeningen in het kader van internationale rapportage zoals IPCC en Kyoto verdragen, waarbij uitgegaan wordt van een tank-to-wheels (TTW) benadering. De reden hiervoor is dat bij de berekening van CO₂ uitstoot voor Nederland de emissies van het well-to-tank deel reeds meegenomen worden in de sector industrie (en in het geval van elektrische voertuigen, de sector elektriciteitsvoorziening). Bij het inzetten van nieuwe energiedragers zoals elektriciteit en waterstof, treedt er een verschuiving op van tank-to-wheels emissies naar well-to-tank emissies (ten opzichte van fossiele brandstoffen). Voor een eerlijke vergelijking tussen de verschillende energiedragers, is het daarom van belang om naar de gehele keten (well-to-wheels) te kijken.

1.3 Randvoorwaarden, uitgangspunten en aannames

Voor de inschatting van de potentiële CO₂ reductie wordt uitgegaan van in hoofdzaak voertuiggebonden technologische innovaties (inclusief voertuiggebonden bestuurders ondersteunende systemen). In verkeer en vervoer zijn door andere maatregelen verdere CO₂ reducties mogelijk, bijvoorbeeld mobiliteitsmanagement, verkeersmanagement, logistieke optimalisatie e.d. Deze maatregelen, die zeker ook innovatief zijn, zijn in onderhavige studie niet meegenomen, maar kunnen een substantiële bijdrage leveren.

Voor de berekeningen en analyse is in belangrijke mate gebruik gemaakt van de ECN verkenning in het kader van het programma 'De auto van de toekomst gaat rijden' [Uyterlinde 2008], die prognoses geeft tot 2030. Daar waar van deze verkenning worden afgeweken, bijvoorbeeld door gewijzigde inzichten, wordt dit in deze rapportage aangegeven.

Bij de berekeningen is uitgegaan van een ontwikkeling van de vervoersprestatie conform het WLO scenario 'Global Economy (GE)', dat een relatief sterke groei van het aantal voertuigkilometers voorspelt. Voor de verschillende vervoersprestaties (voertuigkilometers) is verder uitgegaan van gegevens afkomstig van het Kennis Instituut Mobiliteit (KIM) van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Vanwege de lange termijn van de prognose (meer dan 30 jaar vooruit) is er voor gekozen de berekeningen te baseren op technologie opties die "zoden aan de dijk" zetten en op schattingen van effecten van combinaties van deeltechnologieën, uiteraard rekening houdend met zoveel mogelijk concrete informatie over haalbare reducties. Of anders gezegd: hoe groter de te verwachten reductie, hoe degelijker de onderbouwing.

Aangezien er een veelheid aan technologische (deel-)opties is en er vele onzekerheden en keuzemogelijkheden (transitiepaden) zijn, lijkt het voor de hand te liggen om als resultaat diverse scenario's te presenteren. Toch is er voor gekozen wat betreft het eindresultaat (energie c.q. CO₂ reductie) slechts met één eindplaatje te werken. Dit heeft het voordeel dat het een heldere doelstelling oplevert, uiteraard met een onzekerheidsmarge. Het doel is middels verschillende (inzet van) technologieën te bereiken. Daardoor hebben onderlinge verschuivingen in de mix van technologieën slechts beperkte invloed op het eindresultaat.

1.4 Structuur van de rapportage

Het rapport geeft een beknopte uitleg over de technologie opties en de mogelijke beleidsmaatregelen, alsmede de conclusies en de discussie.

In hoofdstuk 2 is per voertuigcategorie aangegeven wat de bijdrage aan de CO₂ reductiedoelstelling is. Vervolgens zijn per voertuigcategorie de kritische succesfactoren en de belangrijkste beleidsopties aangegeven.

In hoofdstuk 3 is door middel van een overzichtelijke grafische presentatie, een samenvattende totaalschets gegeven van de bijdrage van de verschillende categorieën aan de reductiedoelstelling.

Tenslotte volgen in hoofdstuk 4 de conclusies en een discussie daarvan.

De gedetailleerde onderbouwing van de conclusies is (per voertuigcategorie) opgenomen in de bijlagen.

2 Mogelijke CO₂ reductie en technologie opties per voertuig categorie

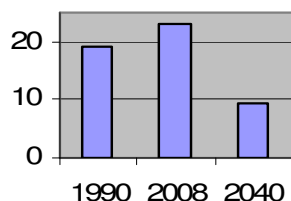
In dit hoofdstuk wordt per voertuigcategorie aangegeven wat de bijdrage aan CO₂ reductie is. Daarna volgen de kritische succesfactoren en belangrijkste beleidsopties per voertuigcategorie. (N.B.: de beleidsopties zijn in de tekst niet expliciet gekoppeld aan de kritische succesfactoren, in het algemeen is het verband duidelijk.)

Voor een gedetailleerdere onderbouwing en discussie van reducties percentages, marktpenetratie en bottlenecks per voertuigcategorie, zie bijlagen.

2.1 Personenauto's: grootste reductie

2.1.1 Bijdrage aan de CO₂ reductie

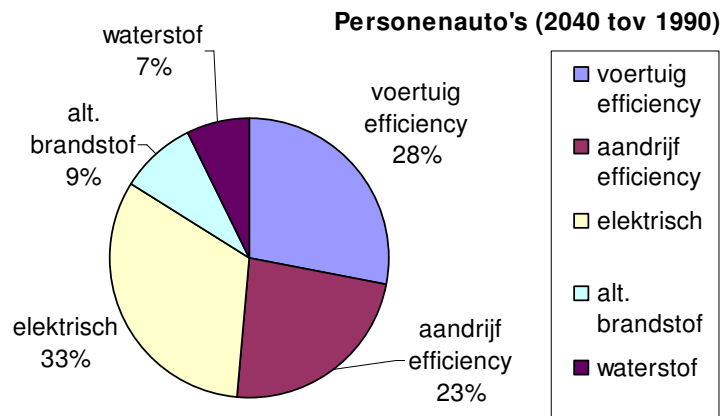
Verreweg de grootste bijdrage aan de reductie (9 van totaal 13 Mton CO₂ reductie) zal volgens onze prognose geleverd worden door het personenauto segment (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1: CO₂ uitstoot personenauto's (in miljoen ton)

De reductie zal hoofdzakelijk bereikt worden door een combinatie van de volgende technologische ontwikkelingspaden (zie Figuur 2.2):

- Verdere optimalisatie van de verbrandingsmotor en aandrijflijn. Belangrijkste bijdragen door “downsizing” van motoren en toepassing van verschillende vormen van hybride aandrijving. Ook zal de efficiëntie van verbrandingsmotoren verbeteren door afnemend gebruik in de stad (daar zal namelijk grotendeels elektrisch worden gereden, zie c).
- De inzet van 30% biobrandstoffen, met een gemiddeld CO₂ reductie percentage van 70% in 2040
- Sterke groei van auto's die met extern opgewekte elektriciteit gevoed worden, volledig elektrisch of via “plug-in” hybride. Aangenomen is dat het grootste deel van de kilometers die niet op de snelweg worden gereden elektrisch wordt gereden (40-50% van de totale voertuigkilometers).
- Het aandeel van voertuigen die (mede) door middel van een brandstofcel aangedreven worden, met waterstof als energiedrager, zal in dit scenario beperkt blijven.
- Parallel aan voorgaande paden een verdere vergroting van de voertuigefficiency, onder meer door: kleinere voertuigen, gewichtsreductie, zuinige banden, zuiniger rijgedrag, toepassing van intelligente voertuigsystemen e.d..



Figuur 2.2: Bijdrage van de verschillende ontwikkelings- of transitiepaden aan de CO₂ reductie voor personenauto's.

Voor het geschetste scenario is nodig dat de productie en infrastructuur voor alternatieve energiedragers zich (verder) ontwikkelt. Met name voor biobrandstoffen en elektriciteit is een significante groei van de productiecapaciteit nodig. Een voordeel van elektriciteit als energiedrager voor transport is dat de CO₂ reducties die in de elektriciteitssector bereikt worden (bijvoorbeeld in het kader van het ETS) “automatisch” doorwerken in de mobiliteitssector.

2.1.2 Kritische succesfactoren personenauto's

T = technologisch risico, I = implementatierisico

- a. Optimalisatie verbrandingsmotor en aandrijflijn
 - Meerkosten hybride t.o.v. traditionele aandrijving beperken (I)
 - Trend naar grotere/zwaardere auto's keren (I)
- b. Biobrandstoffen
 - Verhoging CO₂ reductiepercentage biobrandstoffen bij grootschalige toepassing (T/I)
 - Beschikbaarheid 2de generatie biobrandstoffen (I/T)
- c. Elektriciteit (incl. hybride plug-in)
 - Verdere ontwikkeling batterij technologie en beperking kosten (T)
 - Beschikbaarheid elektriciteit (productievolume en infrastructuur) (I)
- d. Waterstof + brandstofcel voertuig
 - Marktklaar maken brandstofcel technologie (T)
 - Waterstof productie met lage CO₂ inhoud (T)
 - Beschikbaarheid waterstof - infrastructuur (T/I)

Algemeen:

- Totale kosteneffectiviteit voor consument (I)

2.1.3 *Belangrijkste beleidsopties personenauto's*

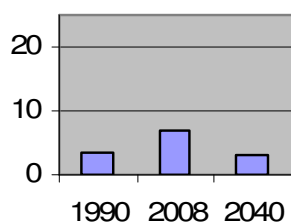
E = Europees, N=nationaal

- Voortgaande EU regelgeving op gebied van CO₂ emissie (of energiegebruik) (E)
- EU regelgeving op gebied van ketenemissies biobrandstoffen (E)
- Nationaal: beprijzen CO₂ uitstoot, via km heffing, BPM, Wegenbelasting, brandstofaccijns, bijtelling lease auto's (N)
- Stimuleren productie en infrastructuur voor elektriciteit, biobrandstoffen en waterstof (N/E)

2.2 **Bestelauto's: bijdrage daalt ondanks sterke groei vervoersprestatie**

2.2.1 *Bijdrage aan de CO₂ reductie*

Bij bestelauto's is door technische maatregelen een zeer aanzienlijke reductie van de CO₂ uitstoot op voertuigniveau mogelijk, echter door de sterke toename van de vervoersprestatie is per saldo de reductie ten opzichte van 1990 zeer beperkt (Figuur 2.3).



Figuur 2.3: CO₂ uitstoot bestelauto's (in miljoen ton)

De aangrijpingspunten bij bestelauto's zijn globaal dezelfde als bij personenauto's genoemd onder a, b, c en e. Gezien het typische rijpatroon (stadsverkeer, veel stops), zijn met name technologieën met energieopslag effectief (hybride, volledig elektrisch).

2.2.2 *Kritische succesfactoren bestelauto's*

Zie in het algemeen de factoren die bij personenauto's een rol spelen voor a, b, c en e. Specifiek voor bestelauto's:

- Betrouwbaarheid nieuwe (hybride en elektrische) technologie (T/I)
- Inzicht in brandstofverbruik alternatieve voertuigen/technologieën (I)
- Ontwikkeling tot aan marktintroductie van efficiënte technologie (I)

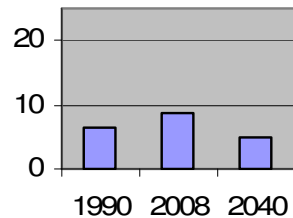
2.2.3 *Belangrijkste beleidsopties bestelauto's*

- Aansluiten bij EU CO₂ regelgeving personenauto's (E)
- Stimuleren/ondersteunen van demoprojecten met alternatieve technologieën (N)
- Bevorderen van inzicht in brandstofverbruik in verschillende voertuigen/technologieën (N)
- Fiscale stimulering elektrisch rijden in binnensteden (pakjes, taxibusjes, loodgieters, etc.) (N)

2.3 Vrachtauto's: bijdrage daalt ondanks sterke groei vervoersprestatie

2.3.1 Bijdrage aan de CO₂ reductie

Bij vrachtauto's is door technische maatregelen een aanzienlijke reductie van de CO₂ uitstoot op voertuigniveau mogelijk, echter door de sterke toename van de vervoersprestatie is per saldo de reductie ten opzichte van 1990 beperkt (Figuur 2.4).



Figuur 2.4: CO₂ uitstoot vrachtauto's (in miljoen ton)

Voor de technische aangrijpingspunten bij vrachtwagens moet een onderscheid gemaakt worden tussen lichte trucks, vooral ingezet bij distributie en zware trucks voor lange afstand transport. Bij lichte trucks is – net als bij bestelwagens – hybride en volledig elektrische aandrijving een geschikte optie. Voor zware trucks en/of langere afstanden blijft de dieselmotor de aangewezen krachtbron, waarbij het rendement omhoog moet door bijvoorbeeld het benutten van restwarmte. Daarnaast zullen alternatieve brandstoffen een rol spelen.

Ook bij vrachtauto's zit potentieel in diverse voertuiggebonden technische optimalisaties. Door een daling van de rolweerstand, een verlaging van het voertuiggewicht en een verbetering van de aerodynamica kan de behoefte aan mechanische energie omlaag.

Bij hybride systemen mag het gewicht niet substantieel stijgen. Dit kan waarschijnlijk bereikt worden door vergaande integratie van componenten, zoals het laten vervallen van de conventionele transmissie bij de installatie van een hybride transmissie.

2.3.2 Kritische succesfactoren vrachtauto's

- Betrouwbaarheid nieuwe (hybride en elektrische) technologie (T/I)
- Inzicht in brandstofverbruik verschillende voertuigen/technologieën (I)
- Ontwikkeling tot aan marktintroductie van efficiënte technologie (I)
- Beperking afname laadvermogen door nieuwe technologie (gewicht, volume) (T/I)
- Lage kosten van nieuwe technologieën vanwege terugverdientijd van extra investeringskosten (T), cq. acceptatie van langere terugverdientijd (I)

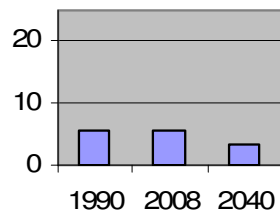
2.3.3 Belangrijkste beleidsmaatregelen vrachtauto's

- EU regelgeving voor CO₂ of brandstofverbruik (E)
- Bevorder inzicht in brandstofverbruik in verschillende voertuigen/technologieën (N)
- Beprijzen CO₂ uitstoot, via Anders betalen voor Mobiliteit (AbvM) e.d..

2.4 Overige categorieën: beperkte bijdrage maar ook hier mogelijkheden

2.4.1 Bijdrage aan de CO₂ reductie

Omdat ze elk slechts beperkt bijdragen aan de CO₂ uitstoot leveren, wordt hier niet gedetailleerd ingegaan op de overgebleven categorieën. Doordat hiervoor nog diverse technologische mogelijkheden aan de voertuigen en aandrijvingkant aanwezig zijn, zullen deze vervoerswijzen een bijdrage aan de reductie leveren (Figuur 2.5).



Figuur 2.5: CO₂ uitstoot overige categorieën (bussen, binnenvaart, trein, mobiele werktuigen, visserij en defensie)

2.4.2 Kritische succesfactoren overige categorieën

- Betrouwbaarheid nieuwe (hybride en elektrische) technologie voor stadsbussen (T/I)
- Gevoeligheid terugverdiendtijd extra investeringskosten bussen (I)
- Lange investeringstermijn schepen maakt tussentijdse upgrades nodig (I)
- Laag innovatiegehalte binnenvaartsector (I)
- Lange investeringstermijn rijdend spoomaterieel maakt tussentijdse upgrades nodig (I)
- Elektrificatie van spoorlijnen met lage vervoersdichtheid niet rendabel (I)
- Inzicht in brandstofverbruik mobiele werktuigen (grote diversiteit type voertuig en gebruik) (I)

2.4.3 Belangrijkste beleidsopties overige categorieën

- OV concessies met voorwaarden t.a.v. brandstofverbruik/CO₂ emissies (N)
- Voorlichting over alternatieve technologie, brandstofbesparingsmogelijkheden e.d. bij schepen (N)
- Subsidiëren ombouw binnenvaartschepen (N)
- Bevorderen elektrische tractie goederenvervoer (N/E)
- Nadere verkenningmogelijkheden bij mobiele werktuigen uitvoeren (N)

3 Samenvattend overzicht CO₂ reductie doelstelling

In het schema is van de belangrijkste voertuigcategorie (personenauto's) een overzicht gegeven van de berekening van de CO₂ uitstoot (Figuur 3.1).

De vermenigvuldiging van de CO₂ uitstoot (over de hele keten) per hoeveelheid energie (de "brandstofkant"), vermenigvuldigd met de benodigde hoeveelheid energie per kilometer (de "voertuigkant") geeft de CO₂ uitstoot per kilometer. Voor de totale CO₂ uitstoot, moet de uitstoot per kilometer dan nog vermenigvuldigd worden met het totale aantal kilometers (de vervoersprestatie).

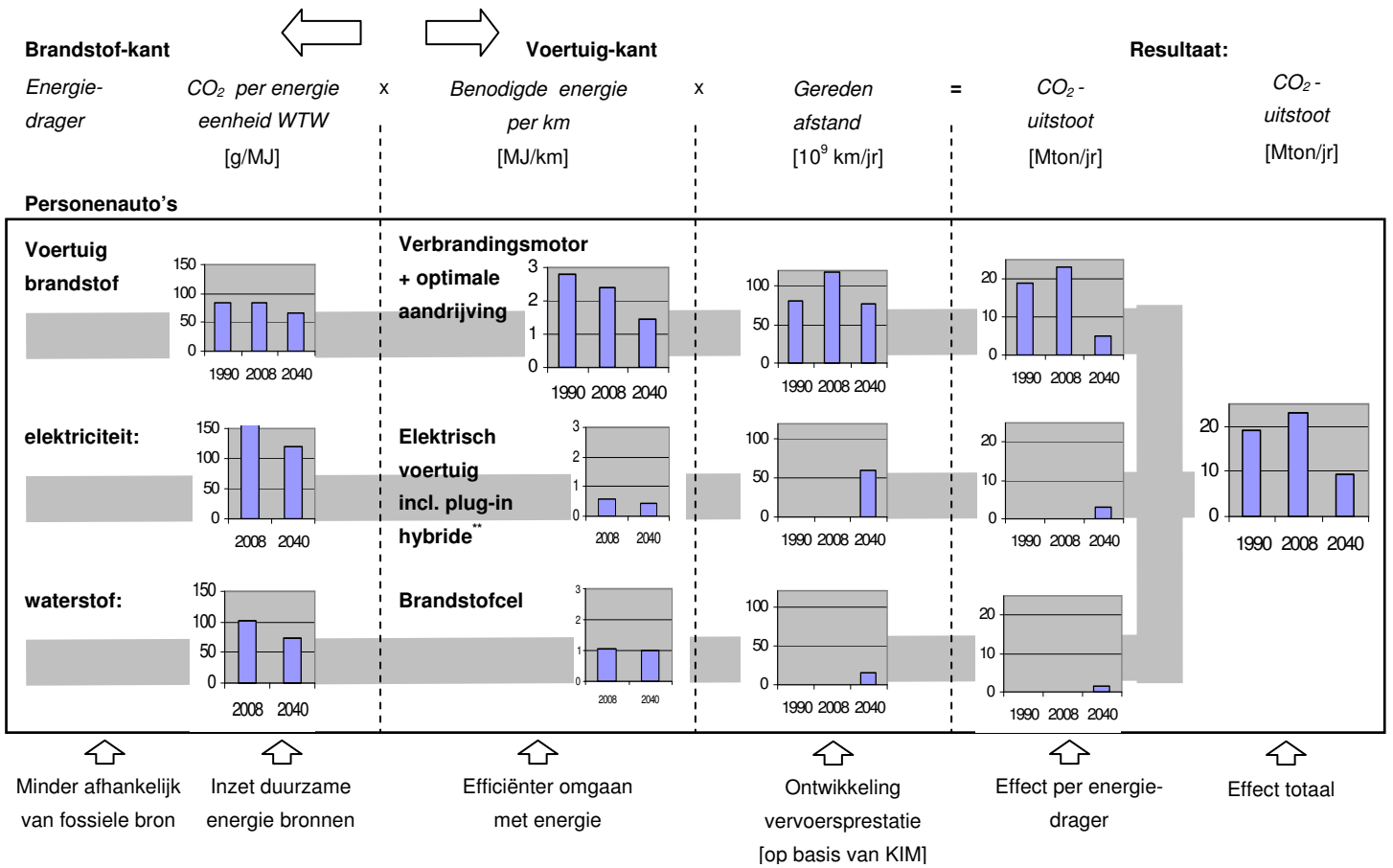
Aan de brandstofkant is bepalend welke energiedrager wordt gebruikt voor het transport, te weten motorbrandstoffen, elektriciteit en waterstof. De berekening is uitgevoerd voor deze drie energiedragers, waarbij de aangegeven vervoersprestaties het aandeel van deze energiedragers bepalen.

De verschuiving naar de alternatieve energiedragers (elektriciteit en waterstof) betekent tevens een vermindering van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen, doordat alternatieve energie-opwekkingsvormen beschikbaar komen.

Aan de voertuigkant is bepalend welke technologie toegepast wordt in het voertuig. Daarbij gaat het om zowel de efficiency van het voertuig als van de aandrijving. Hoe efficiënter hoe minder energie per kilometer nodig is.

Optelling van de CO₂ emissies van de drie energiedragers levert uiteindelijk de totale uitstoot per voertuigcategorie.

De grafieken geven de gehanteerde cijfers weer voor de jaren 1990 (gebruikt als basisjaar/referentie), 2008 (huidige situatie) en 2040 (het jaar voor de lange termijn doelstelling). Zoveel mogelijk is gebruik gemaakt van dezelfde schaalverdeling op de assen, zodat een vergelijking mogelijk is tussen verschillende voertuigcategorieën en verschillende energiedragers.



Figuur 3.1: Samenvattende schets voor CO₂ reductie in personenauto's.

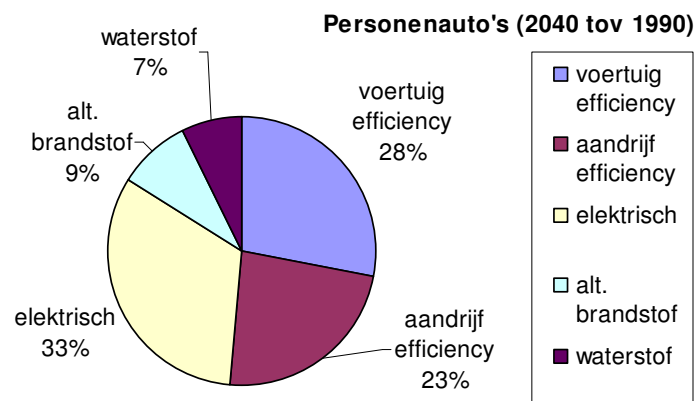
Het overzicht resulteert in een totaal voor de keten-CO₂ uitstoot (well-to-wheels) van continentaal wegverkeer in 2040 in Nederland van 22 Mton (zie tabel 3.1).

	1990	2008	2040
Personenauto's	19	23	10
Bestelauto's	4	7	3
Vrachtauto's	6	9	5
Overig	5	7	4
Totaal	35	46	22

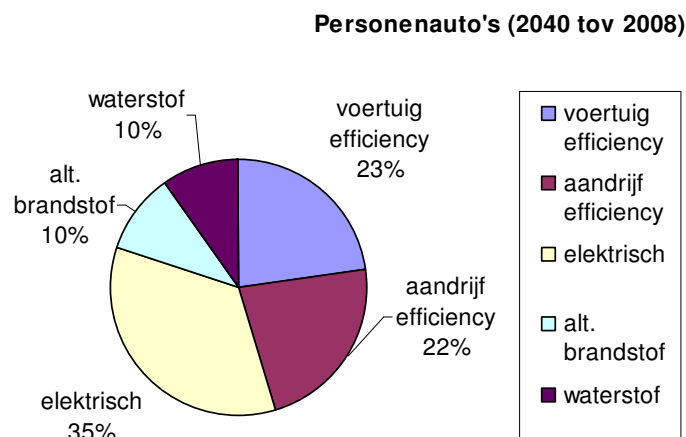
Tabel 3.1: Overzicht CO₂ uitstoot (WTW) van continentaal verkeer in Mton.

Op basis van de gegevens die gebruikt zijn in de hierboven beschreven berekening is een inschatting gemaakt van de bijdrage van de verschillende technologische opties c.q. ontwikkelingspaden aan het bereiken van de reductie doelstelling in 2040. Voor de belangrijkste categorie personenauto's is dit grafisch weergegeven in de figuren 3.2 (ten opzichte van 1990) en 3.3 (ten opzichte van 2008).

N.B.: De in de figuren genoemde percentages suggereren een grote mate van nauwkeurigheid. Daarbij moet bedacht worden dat bij de berekeningen gebruik is gemaakt van een aantal aannames.



Figuur 3.2 Bijdrage technologische opties aan CO₂ reductie van personenauto's (2040 t.o.v. 1990)

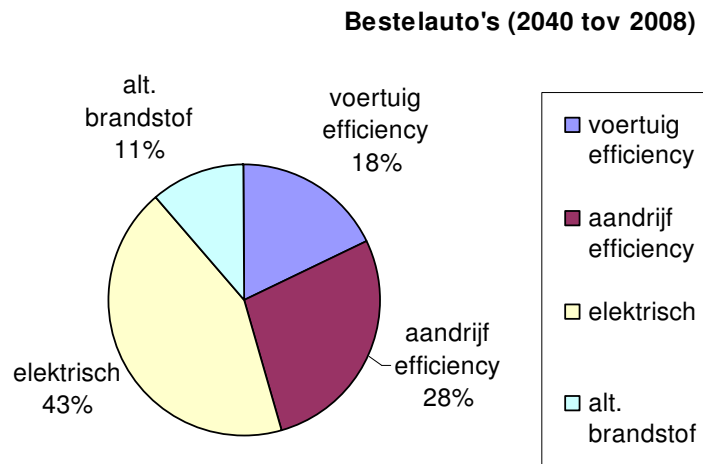


Figuur 3.3 Bijdrage technologische opties aan CO₂ reductie van personenauto's (2040 t.o.v. 2008)

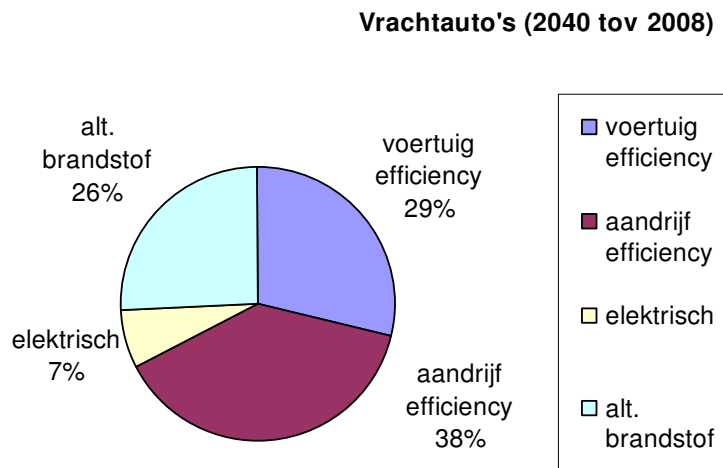
Hieruit kan geconcludeerd worden dat efficiency verhoging van het voertuig en de aandrijflijn de grootste bijdrage zal geven, gevolgd door de inzet van elektriciteit als energiedrager. Het aandeel van de inzet van alternatieve motorbrandstoffen en van waterstof wordt als aanzienlijk kleiner ingeschat.

Vergelijking van beide figuren laat het relatief toenemende belang van elektriciteit in de tijd zien, aangezien een deel van de voertuig/aandrijving efficiency maatregelen tussen 1990 en 2008 al hebben geleid tot reductie en de inzet van elektriciteit nog vrijwel volledig van de grond moet komen.

Figuren 3.4 en 3.5 geven de bijdragen aan de reductie in 2040 t.o.v. 2008 voor respectievelijk bestelauto's en vrachtauto's.

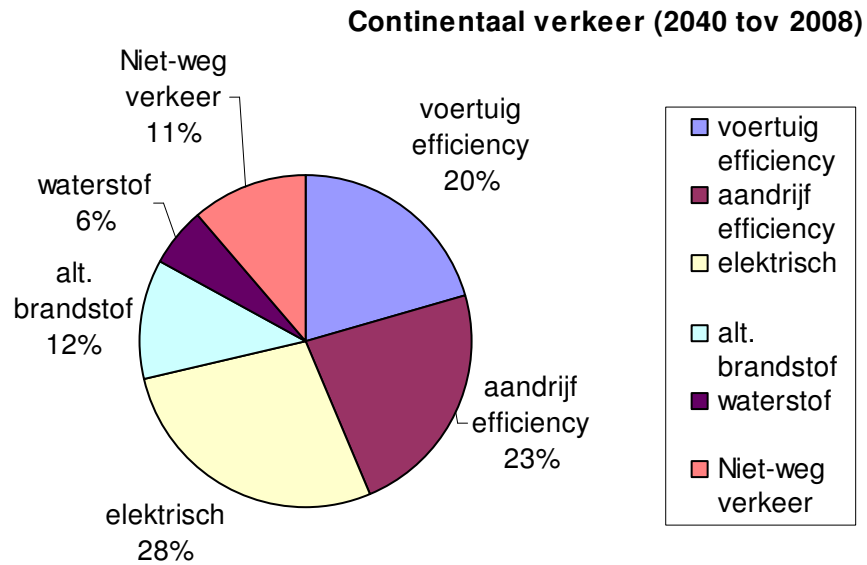


Figuur 3.4 Bijdrage technologische opties aan CO₂ reductie van bestelauto's (2040 t.o.v. 2008)



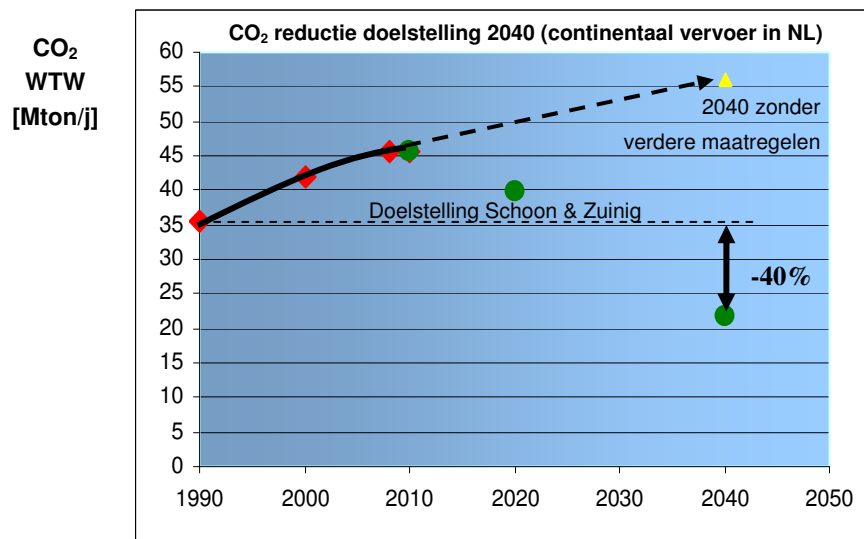
Figuur 3.5 Bijdrage technologische opties aan CO₂ reductie van vrachtauto's (2040 t.o.v. 2008)

In figuur 3.6 zijn de bijdragen aan de reductiedoelstelling 2040 ten opzichte van 2008 van alle beschouwde vervoerssegmenten samen weergegeven (continentaal vervoer), waarbij de technologische opties van de kleinste segmenten (niet-wegverkeer) niet gespecificeerd zijn.



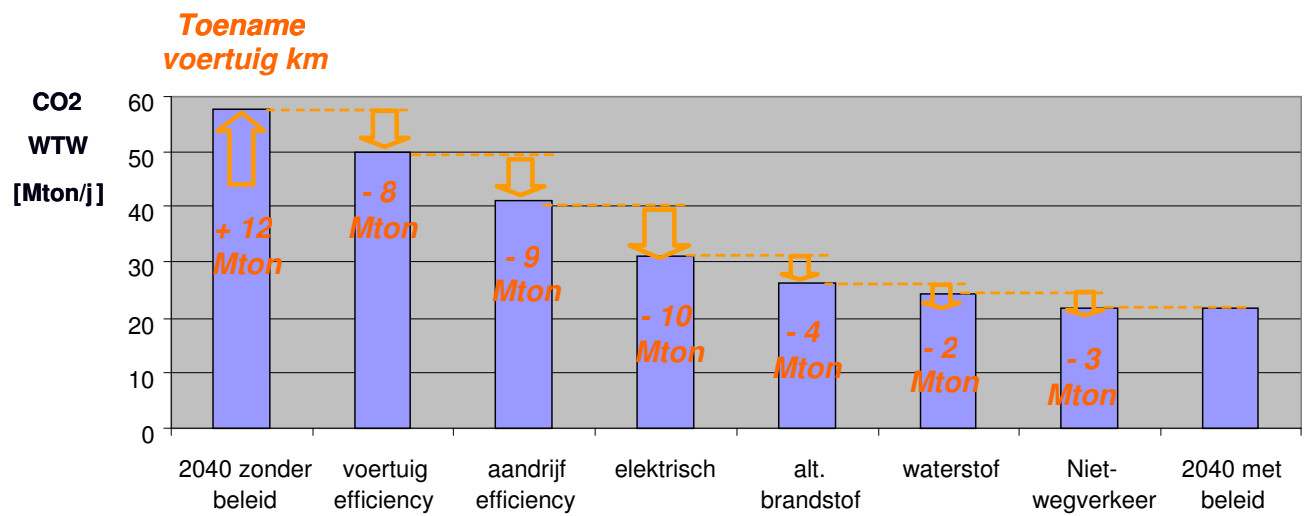
Figuur 3.6 Bijdrage technologische opties aan CO₂ reductie van alle vervoerssegmenten (2040 t.o.v. 2008)

Figuur 3.7 geeft de algemene reductie grafiek met daarin aangegeven welke uitstoot in 2040 verwacht kan worden zonder verdere maatregelen (echter wel met de verwachte vervoersprestatie van de verschillende segmenten).



Figuur 3.7: CO₂ reductiedoelstelling voor 2040 voor continentaal vervoer in Nederland (well-to-wheels), incl. indicatie CO₂ uitstoot 2040 zonder verdere maatregelen

Ter illustratie laat figuur 3.8 de bedragen van de verschillende technologische opties zien aan de CO₂ reductie ten opzichte van de verwachte situatie in 2040 zonder verdere maatregelen (na 2008).



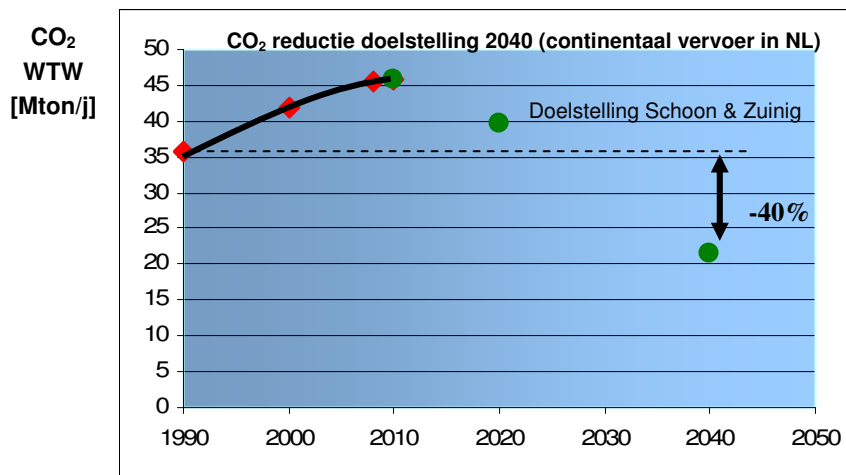
Figuur 3.8: Bijdrage technologische opties aan CO₂ reductiedoelstelling voor 2040 ten opzichte van situatie in 2040 zonder verdere maatregelen na 2008

4 Conclusies en discussie

4.1 Conclusies

TNO heeft een studie uitgevoerd naar CO₂ besparingsmogelijkheden in het Nederlandse continentaal vervoer tot het jaar 2040. Gebruik is gemaakt van bij TNO aanwezige kennis en van gegevens uit de literatuur, aangevuld met inschattingen op basis van externe informatie en TNO expertise.

Hoofdconclusie is dat voor het continentaal vervoer in Nederland een reductie van ca. 40% in de CO₂ uitstoot ten opzichte van 1990 mogelijk is door middel van technologische innovaties en toepassing van alternatieve energiebronnen.



Figuur 4.4.1: CO₂ reductiedoelstelling voor 2040 voor continentaal vervoer in Nederland (well-to-wheels).

Overige conclusies

- Het grootste aandeel in de CO₂ reductie wordt gerealiseerd bij personenauto's.
- De belangrijkste technologische opties zijn: efficiency vergroting van voertuig en aandrijving en elektriciteit als energiedrager.
- Beleidsmaatregelen om dit te bereiken zijn beschikbaar.
- De nieuwe technologieën zullen kosten met zich mee brengen, zeker in de aanloopfase.
- De doelstelling vergroot tevens de energiezekerheid en benut de innovatiekracht van Nederlandse bedrijven.

Technologische ontwikkelingen

Samenvattend worden de volgende voertuiggebonden technologische ontwikkelingen voorzien:

- Verbetering van de efficiency van de verbrandingsmotor en aandrijving, zoals downsizing, hybridisering, inzet van eco-driving systemen, etc..
- Efficiency verbeteringen aan het voertuig, zoals een afname van gewicht, rol- en lucht weerstand, etc..
- Sterke ontwikkeling van elektriciteit als energiedrager voor personenauto's, bestelvoertuigen en distributietrucks met een plug-in hybride of volledig elektrische aandrijving. In 2040 wordt een marktaandeel voorzien van respectievelijk 40%, 50% en 15% voor respectievelijk personenwagens, bestelwagens en vrachtwagens;
- Significante inzet van biobrandstoffen.
- Een beperkte rol voor waterstof als energiedrager (voor personenauto's).

Overheidsbeleid

De belangrijkste beschikbare beleidsopties op Europees niveau zijn:

- Het (op Europees niveau) eens worden over de lange termijn doelstellingen voor CO₂ reductie en/of energie efficiency.
- Actief (verder) ontwikkelen van lange termijn Europese wetgeving op het gebied van efficiency eisen aan personenauto's, bestelauto's, vrachtauto's, en ook binnenvaart en non-road voertuigen.
- Actief ontwikkelen van Europese wetgeving m.b.t. het aandeel duurzame brandstof en de CO₂ besparing van duurzame brandstof t.o.v. conventionele brandstof
- Stellen van normen voor de brandstoffen op basis van de well-to-tank uitstoot. Later eventueel voor de well-to-wheels uitstoot.
- Het ontwikkelen van prijsmechanismen, bijvoorbeeld gericht op het internaliseren van externe kosten. Denkbaar is ook het opzetten van een Europees systeem van emissiehandel voor de transportsector (voor goederenvervoer, dus gericht op vrachtauto's, mogelijk scheepvaart, treinen, niet op personenauto's en bestelauto's). Daarbij moet worden opgemerkt dat door elektrificeren van transport een deel van de transport CO₂ emissies "vanzelf" onder ETS zullen vallen.
- Geleidelijke verhoging van de Europese minimum niveaus voor de brandstofaccijnzen.

De belangrijkste beleidsopties op nationaal niveau zijn:

- Beprijzen en toelaten in diverse vormen: financiële prikkels voor de aanschaf van CO₂ arme voertuigen en brandstoffen, zoals differentiatie van BPM, MRB, accijnzen en eventueel subsidies, inclusief een samenhangend pakket aan flankerende maatregelen.
- Diverse stimuleringsmaatregelen voor de ontwikkeling en implementatie van nieuwe technologie, inclusief bevordering van onderzoek en ontwikkeling van CO₂ arm transport, voorlichting aan consumenten en transporteurs over de mogelijkheden en het opzetten van grootschalige demoprojecten. Ook kan de overheid, naast industriële partijen, optreden als launching customer.

4.2 Discussie

In dit rapport is door TNO een eerste analyse gedaan naar de mogelijkheden van CO₂ emissie reductie van het continentaal vervoer op de wat langer termijn (tot 2040). Uit deze analyse blijkt dat een forse CO₂ reductie mogelijk is door in te zetten op alle beschikbare technologische opties. Dit betekent een combinatie van het inzetten op alternatieve energiedragers enerzijds en op verlaging energiebehoefte van de transport middelen.

Bij het gepresenteerde plaatje voor 2040 moet worden opgemerkt dat dit niet hét toekomstscenario is dat met grote waarschijnlijk gerealiseerd gaat worden. Daarvoor zijn er teveel onzekerheden. Het moet gezien worden als een indicatie van wat technologisch haalbaar lijkt en biedt als zodanig aanknopingspunten voor beleidsmaatregelen.

Op de robuustheid wordt in het hierna volgende verder ingegaan.

Technische en implementatie risico's

Aan de voertuigkant vormt voor elektrische aandrijving waarschijnlijk alleen de batterijtechnologie (en kosten daarvan) een aanzienlijk risico voor het realiseren van de CO₂ doelstelling. Voor het alternatief, het brandstofcelvoertuig, lijken de technische en implementatierisico's echter groter te zijn.

Aan de brandstofkant zijn er technische en implementatie risico's met betrekking tot het realiseren van een voldoende groot aandeel van duurzame brandstof dat voldoet aan de milieu- en duurzaamheidscriteria.

Ten aanzien van de inzet van elektriciteit als energiedrager zijn er implementatierisico's ten aanzien van de beschikbaarheid van de benodigde infrastructuur.

Daarnaast zijn er implementatierisico's met betrekking tot de lange termijn wetgeving m.b.t. CO₂ emissies in het algemeen.

Aandachtspunten voor beleid

Om de doelstellingen voor voertuigefficiency op de lange termijn te waarborgen is het nodig om zowel op Nationaal als Europees niveau tot lange termijn afspraken te komen met de industrie. Het gaat dan over een termijn van tientallen jaren met tussentijdse mijlpalen. Zo'n (politieke) onderhandeling met de industrie zal een aantal jaren in beslag nemen. Daarnaast kost ook de technisch- inhoudelijke uitwerking de nodige tijd. Essentieel is dat de Europese overheid een lange termijnvisie krijgt en dat de belangrijke individuele landen deze visie ondersteunen. Daarna kan er aan de wetgeving gewerkt worden. Voorts is het belangrijk dat de doelstelling bestand is tegen eventueel dalende olieprijsen.

Nederland kan in dit Europese spel een belangrijke rol spelen, vanwege de relatief grote onafhankelijk van de auto-industrie. Dit is duidelijk aangetoond bij de ontwikkeling van de Europese emissiewetgeving, waarbij Nederland steeds een voortrekkende rol heeft vervuld. Dit was mede mogelijk door een sterke inhoudelijke onderbouwing. Ook bij het bereiken van CO₂ doelstellingen kan Nederland deze rol vervullen, waarbij nauwe samenwerking met "gelijkgezinde" landen aan te bevelen is.

Internationale lange termijn doelstellingen zijn ook nodig voor de productie en inzet van biobrandstoffen. Voor deze studie zijn voor het biobrandstof aandeel eenvoudige aannamen gedaan, namelijk 20% duurzame energie voor elektrische energie en 30% duurzaam voor de conventionele brandstoffen (gebaseerd op een extrapolatie van [ECN 2008], maar met een conservatieve interpretatie gebaseerd op [Verbeek 2008]). Een lastige opgave, te meer daar de biobrandstofindustrie erg gedifferentieerd is en minder

georganiseerd dan de auto- en conventionele brandstofindustrie. Daarnaast spelen zaken als een lage investeringsbereidheid, de sociale en milieuaspecten van de productie van de brandstof, concurrentie met voedsel en de verdeling van de grondstoffen over de verschillende sectoren een rol.

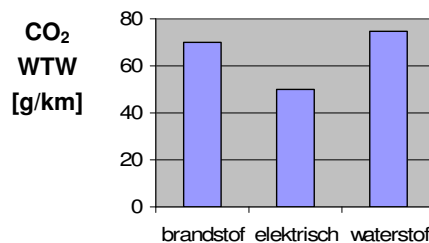
De toenemende olieprijs vergroot kansen voor nieuwe (duurdere) technologie en versnelt ontwikkelingen. Het lijkt er op dat er een trendbreuk aan de gang is, waarbij de stijgingen niet marginaal, geleidelijk en/of tijdelijk zijn. De eerste tekenen van mogelijk drastische wijzigingen van het aankoopgedrag zijn aanwezig, zoals bijvoorbeeld het afnemen van de SUV-markt, zoals recent in de pers is gemeld. Het marktaandeel van kleine, zeer zuinige auto's stijgt.

Er zijn echter nog veel onzekerheden. Het is van belang de ontwikkelingen goed te volgen omdat het van invloed is op de te nemen beleidsmaatregelen.

Robuust programma?

Bij een "looptijd" van meer dan 30 jaar is het moeilijk een inschatting te geven van de robuustheid van het scenario. Wel is het zo dat de geschetste ontwikkelingen –voor personenauto's- over een breed front in gang zijn gezet en de industrie forse investeringen doet in de benodigde technologieën. Vrij recent is dat voor elektrische voertuigen overtuigend duidelijk geworden.

Het vertrouwen in de robuustheid wordt versterkt doordat er in orde van grootte geen grote verschillen zijn in de geschatte CO₂ emissies van de verschillende energiedragers in 2040. Met andere woorden: onderlinge verschuivingen in deze mix hebben beperkte invloed op het eindresultaat. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 4.1, waarin te zien is dat het WTW CO₂ reductiepotentiëel van 3 hoofdopties in orde van grootte niet veel verschilt.



Figuur 4.1: Vergelijking well-to-wheels CO₂ emissies in 2040 voor personenauto's met verschillende energiedragers en bijbehorende aandrijving.

Dit is de inschatting/berekening zoals gebruikt voor deze studie. Het aandeel duurzame energie voor de energiedragers motorbrandstoffen, elektrisch en waterstof is hierbij gesteld op resp. 30, 20 en 25%. Met name mogelijke veranderingen in de aandelen duurzame energie kunnen tot veranderingen in dit plaatje leiden.

NB. brandstof betekent hier een mix van fossiele en alternatieve brandstoffen.

Daarnaast geeft het gebruik van kleinere personenauto's - indien dit echt doorzet - een groot aanvullend effect. In deze studie is dit niet meegenomen. Dit is wel een belangrijke factor die bijdraagt aan de robuustheid!

Kosten spelen een rol bij de acceptatie van nieuwe technologieën en de implementatiesnelheid ervan. Daarbij moet worden opgemerkt dat de meeste alternatieve technologieën relatief duur zijn in het begin van hun ontwikkelings- en

implementatiefase, maar de ervaring leert dat bij productie op grote schaal (zoals in sterke mate het geval is bij personenauto's) de kosten sterk dalen. Dit neemt niet weg dat voertuigen mogelijk duurder worden. Nauwlettend volgen en opstellen van prognoses voor de kostenontwikkelingen is nodig om tot een goede uitwerking van beleidsmaatregelen te komen.

De robuustheid wordt tenslotte in belangrijke mate bepaald door het consistent inzetten door de overheid op meerdere van de genoemde beleidsopties. Daarbij moet zeker ook het stimuleren van technologieontwikkeling en -implementatie –daar waar effectief– door middel van grootschalige demo's meegenomen worden. Dit is vaak nodig om de marktintroductie van nieuwe technologie te versnellen en biedt daarnaast kansen voor innovatieve bedrijven.

Kansen voor de BV Nederland

Nederland heeft een aanzienlijke ontwikkelings- en productiesector op het gebied van voertuigaandrijving en brandstoffen, met tal van grote en kleinere innovatieve bedrijven (zie bijlage F voor een overzicht). De genoemde doelstelling biedt deze sector veel kansen, zeker indien dit gestimuleerd wordt door overheidsprogramma's, gericht op technologie ontwikkeling en implementatie. Met andere woorden: "Nederland als proeftuin" voor innovaties voor Mobiliteit en Milieu draagt bij aan het realiseren van de reductiedoelstelling, met een optimaal economisch voordeel van het bedrijfsleven. Hiervoor is het wel noodzakelijk dat de overheid -ook op de langere termijn- een stabiele partner is.

5 Literatuur

- [Cramer 2007] Cramer, J.M. et al. (2007), *Nieuwe energie voor het klimaat – Werkprogramma schoon en zuinig*, VROM
- [Den Boer 2008] Den Boer, L.C., et al. (2008), *STREAM, Studie naar TRansport Emissies van Alle Modaliteiten*
- [Passier 2007] Passier, G.L.M., et al. (2007), *Status overview of hybrid and electric vehicle technology (2007)*, final report phase III, Annex VII, IA-HEV, IEA
- [Smokers 2006] Smokers, R.T.M., et al (2006), *Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO₂ emissions from passenger cars*, Contract number SI2.408212 (for EC DG ENTR), TNO report
- [Uyterlinde 2008] Uyterlinde, M.A., et al.(2008), *Effecten en kosten van duurzame innovatie in het wegverkeer – Een verkenning voor het programma ‘De auto van de toekomst gaat rijden’*, rapport ECN-E-07-106
- [Verbeek 2008] Verbeek, R., et al. (2008), *Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles*, TNO rapport nummer MON-RPT-033-DTS-2008-01737
- [Raad voor Verkeer en Waterstaat 2008]
Raad voor Verkeer en Waterstaat, VROM-Raad en Algemene Energieraad (2008), *Een prijs voor elke reis – Een beleidsstrategie voor CO₂ reductie in verkeer en vervoer*

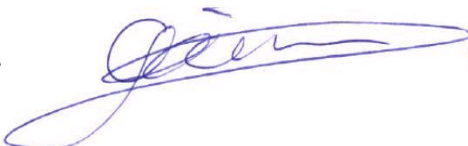
6 Ondertekening

Delft, 22 september 2008

TNO Industrie en Techniek



B. Bos
Afdelingsmanager



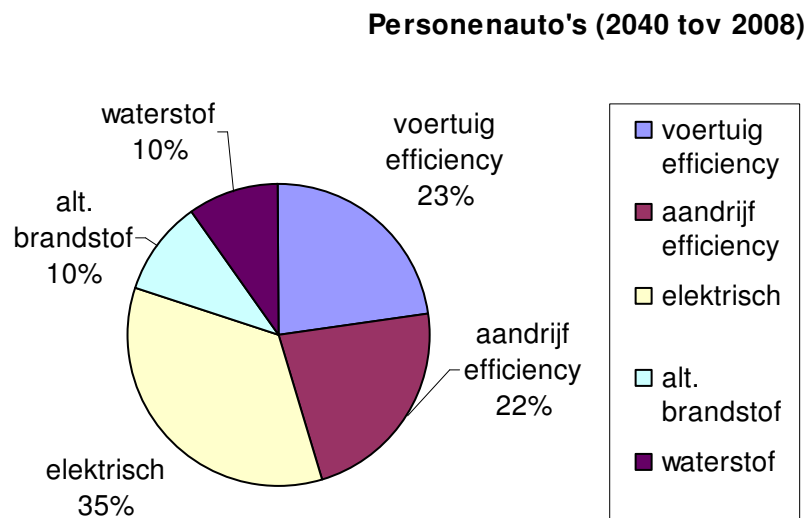
G.L.M. Passier
Auteur

A Personenauto's

In deze bijlage worden de verschillende ontwikkelingspaden (of transitiepaden) die zorgen voor de CO₂ reductie bij personenauto's toegelicht. In de eerste paragraaf (A1), worden de reducties door verbetering van de motor efficiency en biobrandstoffen toegelicht. Daarna volgt in paragraaf A2 de bijdrage van elektrische aandrijving. De bijdrage van waterstof wordt toegelicht in paragraaf A3. Ten slotte wordt de bereikte reductie door middel van voertuigmaatregelen toegelicht in paragraaf A4.

Het overzicht van de verdeling over de bovenstaande technologieën:

- Efficiency motor 22% (A1)
- Voertuigefficiency 23% (A4)
- Elektrisch 35% (A2)
- Alternatieve brandstoffen 10% (A1)
- Waterstof 10% (A3)



Figuur 2.2: Bijdrage van de verschillende ontwikkelings- of transitiepaden aan de CO₂ reductie voor personenauto's.

A.1 Alternatieve (bio-) brandstoffen en optimale verbrandingsmotor voertuig

Het technologie pad alternatieve brandstoffen en voertuigen met verbrandingsmotor haalt de reductie van CO₂ uitstoot door a) toepassing van maatregelen om aandrijfefficiency te verbeteren en b) toepassing van alternatieve brandstoffen. Het aandeel van dit technologie pad in het totaal aantal voertuigkilometers van personenauto's wordt in deze studie ingeschat op ongeveer 50%.

a) Reductiepotentieel aandrijfefficiëntie: 35-40%

Verbrandingsmotor continu: verdere verbetering benzine- en dieselmotoren, directe inspuiting bezinemotoren, downsizing van motoren, vermindering wrijvings- en warmteverliezen e.d.

Verbetering rendement door verschuiving van het gebruik van verbrandingsmotoren van stad naar snelweg (stadskilometers zullen grotendeels elektrisch worden gereden in 2040).

Inschatting: 20-25%

N.B. Op lange termijn wellicht mogelijkheid voor Combined Combustion System (CCS – combinatie van diesel en benzine verbrandingsprocessen). Dat is in deze studie niet expliciet meegenomen.

Aandrijflijn korte + middellange termijn: verbetering transmissies (bijv. Direct Shift Gearboxes, CVT), diverse vormen van hybride aandrijving: micro, mild, full (zonder plug-in). Hybride: sterk afhankelijk van gekozen technologie en toepassingsgebied, variërend van 5% (start-stop) tot 25% voor full hybrid (ten opzichte van conventioneel aangedreven voertuig).

Inschatting 15-20%

Verbetering rendement door verschuiving van het gebruik van verbrandingsmotoren van stad naar snelweg (stadskilometers zullen grotendeels elektrisch worden gereden in 2040).

b) Reductiepotentieel brandstof kant: 20%

Aangenomen is een relatief geringe bijdrage van LPG/CNG (5%).

Aandeel biobrandstoffen wordt in [Uyterlinde 2008] geschat op 30% in 2030 (in scenario 2). In deze studie is gekozen voor een conservatieve inschatting ten opzichte van de ECN studie [Uyterlinde 2008] op basis van resultaten van een recente BOLK studie [Verbeek 2008].

De reductiepercentages voor 1^e en 2^e generatie zijn ingeschat (op basis van EU directive) op -50% respectievelijk -80%. Dit resulteert in een gewogen gemiddelde reductie van 70%. Met het eerder geschatte aandeel van 30%, levert dit een totale reductie voor het WTT deel van 20% in 2040.

A.2 Elektriciteit en plug-in hybride voertuig

Korte termijn (vanaf 2015): plug-ins voor hybride aandrijving. Langere termijn (vanaf 2035): volledige elektrische aandrijving, met name voor de korte afstand (megacities & large urban areas, maximum 200 km/dag). Batterij technologie is kritische pad, maar met lithium-ion technology lijkt veel mogelijk (doelstelling nuttige vermogensdichtheid 200 Wh/kg, nu: 20 Wh/kg). Echte uitdagingen liggen daarbij op het gebied van de levensduur, veiligheid en kosten.

Dit lijkt in een stroomversnelling te komen, alle grote autofabrikanten zijn hier mee bezig (incl. inkopen van bedrijven!)

Reductiepotentieel

Plug-in hybride: 35% (t.o.v. hybride aangedreven voertuig); hoger percentage bij groene stroom [schatting TNO]. In deze studie is er van uit gegaan dat in 2040 alle kilometers in de stad elektrisch gereden zullen gaan worden (dat kan zowel door elektrisch deel van een plug-in hybride als door een volledig elektrisch voertuig). Daarnaast zal een deel van de buitenweg kilometers ook elektrisch kunnen worden aangedreven. Echter de kilometers op snelweg zullen geheel door verbrandingsmotor met fossiele en/of biobrandstoffen worden gereden.

De verdeling van de totale aantal kilometers over de wegtype is als volgt (2010):

Stad : 25%

Buitenweg: 35%

Snelweg: 40%

Met deze verdeling wordt het aandeel elektrisch in 2040 geschat op 40% (stad + helft buitenweg).

Voor de WTT kant (energie drager), de elektriciteitsopwekking, is uitgegaan van de door ECN geschatte koolstofinhoud (g CO₂ / MJ), verder geëxtrapoleerd naar 2040.

2005-2010: 156 g CO₂/MJ

2020-2030: 137 g CO₂/MJ

2040 : 120 g CO₂/MJ

Dit komt neer op een aandeel duurzame energie van minimaal 20%.

Energie benodigd voor cyclus in 2008: 0,52 MJ/km (inclusief regeneratief remmen).

Inschatting voor 2040 (met voertuigmaatregelen (zie A4) en innovatie): 0,42 MJ/km

Bottlenecks

1. Batterijtechnologie
2. Beschikbaar netvermogen
3. Laadinfrastructuur
4. Draagvlak stakeholders

Ad 1.

Batterijen hebben een grote invloed op de prestaties van het voertuig tijdens elektrisch rijden. Om een significante afstand elektrisch als zero-emission vehicle (ZEV) te kunnen rijden, is een grote batterij nodig. Vanwege de lagere energiedichtheid en lagere soortelijke energie van batterijtechnologie in vergelijking met bijvoorbeeld benzine, neemt de batterij veel ruimte in beslag. Daarnaast neemt het voertuiggewicht hierdoor toe. Als er grote aanpassingen van het voertuigplatform nodig zijn om de batterij in te bouwen, komen er ook significante re-engineering kosten bij.

Een batterij in een voertuig die significant ZEV rijden mogelijk maakt, is ook zeer zwaar belast. Om levensduur te waarborgen, moet de batterij groter gemaakt worden dan strikt gewenst is. De bovenstaande factoren samen met de hoge kosten van batterijtechnologie in het algemeen (zeker bij lagere aantallen) leiden tot een zeer duur voertuig. Economische verantwoording voor het aanschaf en inzet van dergelijke voertuigen wordt daarbij zeer lastig.

Daarnaast zouden nieuwe voertuigtypes (bv. ultra kleine stadsvoertuigen) nodig kunnen zijn indien er geen doorbraak komt op het gebied van batterijontwikkeling (die nu nog

niet in zicht is). Dit levert een hoger risico op voor fabrikanten, zeker bij een onbewezen markt vraag. Dit risico zal zeker belemmerend werken voor de introductie van dit soort voertuigen.

Ad 2.

Afhankelijk van het aantal elektrische voertuigen, laadpatronen en laadsnelheid, wordt het elektriciteitsnet mogelijk zwaarder belast. Voldoende capaciteit moet beschikbaar gesteld worden, hetgeen tot grote netinvesteringen kan gaan leiden.

Ad 3.

Het kunnen laden van elektrische voertuigen hangt af van beschikbaarheid van geschikte laadapparatuur. Op veel plaatsen in Nederland is er geen toegang tot eigen oplaadpunten c.q. stopcontacten. Deze huishoudelijke aansluitingen zijn geschikt voor zeer laag vermogen, dat tot lange laadtijden zal leiden. Om snelladen mogelijk te maken, zullen speciale aansluitingen moeten aangelegd worden met alle investeringen van dien. Tevens is standaardisatie van belang om ervoor te zorgen dat alle voertuigen geschikt zijn voor de laadapparatuur.

Ad 4.

Een sterke groei in elektrische voertuigen heeft een grote impact op meerdere stakeholders. Voorbeelden zijn: grondstofleveranciers die batterijmaterialen leveren, batterijfabrikanten die capaciteit moeten opbouwen, voertuigfabrikanten die bestaande capaciteit af zouden moeten bouwen, energietoeleveranciers en netbeheerders, door tot de eindconsument. Voldoende capaciteit en infrastructuur zal nodig zijn op alle schakels in de keten, te samen met ondersteuning om investeringsrisico's te dekken.

A.3 Waterstof en brandstofcel voertuig

De ontwikkeling van brandstofcellen als energiebron voor voertuigaandrijvingen is al jaren in ontwikkeling. De eerste prototypes van fuel cell cars rijden al wel rond maar door een aantal kritische bottlenecks en de potentiële CO₂-reductie, die in vergelijking met andere technologieën aan de lage kant zit, zal het nog een aanzienlijke tijd duren voordat deze ook daadwerkelijk commercieel verkrijgbaar zijn. Daarom wordt het aantal waterstofvoertuigen dat in 2040 rond zal rijden conservatief ingeschat op 12%. Dit percentage komt overeen met het "modest policy" beleid beschreven in [4].

Reductiepotentieel

Ten aanzien van de CO₂ -emissies is het type productieproces dat gebruikt wordt om waterstof maken kritisch [5]. Er zijn zeer schone maar ook zeer vervuilende methoden om waterstof te produceren. Over het algemeen genomen geldt echter dat de totale keten efficiency van Well to Wheel te laag en is het gunstiger om de energiebronnen op een andere manier voor mobiliteit in te zetten. Uitgaande van de verwachte productiemix van waterstof en verbetering van de voertuigtechnologie voor brandstofauto's zal een waterstofauto in 2040 ongeveer 75 g CO₂/km uitstoten. Dit is ongeveer 30 % lager dan een huidige waterstofvoertuigen.

Er is een groot verschil in CO₂ uitstoot voor de verschillende productieprocessen van waterstof. De productieprocessen kunnen grofweg in vier categorieën opgedeeld worden:

- Steam reforming van aardgas of andere fossiele brandstoffen
- Waterstofproductie via elektrolyse
- Vergassen van biomassa
- In kerncentrales

Hierbij valt de laatste optie door Nederlands beleid op het gebied van kernenergie af. Het gebruik van aardgas in een stoomreformingsproces, eventueel met CO₂ afvang is op dit moment één van de meest voor de hand liggende methodes. Dit levert uiteindelijk een uitstoot van 103 g CO₂/MJ op (zie tabel). Elektrolyse heeft een zeer laag rendement waardoor het maken van waterstof uit elektriciteit niet echt voor de hand ligt. Het gebruik van windenergie lijkt hier wel gunstig aangezien dit tot 0 g CO₂/MJ uitstoot leidt. Echter, alleen het overschot van windenergie kan echt nuttig gebruikt worden voor dit doeleinde. Wanneer naar de totale keten efficiëntie van well to wheels gekeken wordt is het over het algemeen gunstiger om elektriciteit op te wekken (bijvoorbeeld met biomassa, wind of kolen) en deze energie te gebruiken voor elektrische voertuigen, in de plaats van het produceren van waterstof om daarmee de aandrijving te realiseren. Op basis van deze ketenanalyse wordt er een matige inzet van waterstofvoertuigen in de toekomst verwacht.

Productietechniek	g CO ₂ /MJ	% in de mix	Totale bijdrage
Vergassen van Biomassa	22	0.15	3.3
Elektrolyse uit windenergie	0	0.1	0
Elektrolyse uit net-energie	208	0.1	20.8
Steam-reforming van natural gas	103	0.4	41.2
Waterstof uit kolen met CO ₂ afvang	38	0.25	9.5
Mix		1	74.8

Tabel : CO₂ productie voor verschillende productieprocessen (well to tank (WTT)) en de bijdrage aan de mix voor 2040.

In deze tabel is ook weergegeven welke mix van waterstof productie hoogstwaarschijnlijk in 2040 gebruikt wordt [5]. Met deze mix ontstaat er tijdens de productie van waterstof 74.8 g CO₂/MJ van WTT. In het oogpunt van duurzaamheid wordt geadviseerd om zoveel mogelijk duurzame methoden voor waterstof productie te stimuleren zodat deze in de toekomst in voldoende mate aanwezig zijn en kosteneffectief worden.

Brandstofcel

Waterstof kan gebruikt worden om omgezet te worden in elektriciteit in een brandstofcel. De maximale efficiency hierbij ligt rond de 58% in het optimale werkpunt. Wanneer de brandstofcel in dit stationaire werkpunt bedreven wordt, levert deze een constant vermogen. Dit betekent dat als het voertuig minder energie vraagt dan de brandstofcel levert, er energie in een batterij wordt opgeslagen. Vraagt het voertuig meer, dan levert de batterij de extra energie. De efficiency van de batterij is hierbij +/- 90%. Vervolgens wordt de energie omgezet in beweging door de elektromotor die ook weer een efficiency heeft van rond de 85%. De totale voertuig efficiency komt dan uit op 40 %, wat aanmerkelijk hoger is dan de conventionele verbrandingsmotor (maximaal 25%).

Waterstofverbranding in een ICE

De tweede mogelijkheid is om waterstof in een internal combustion engine te verbranden. Op dit moment wordt er volop onderzoek gedaan naar dit principe. Op dit moment wordt er een efficiëntie van rond de 35% gehaald. Men hoopt in de toekomst echter naar een motor efficiency van 50% te gaan [3]. Tijdens deze verbranding komen er, in tegenstelling tot diesel of benzine motoren, geen CO₂ emissies vrij. Een goede optie is om waterstof te verbranden in een bi-fuel verbrandingsmotor. Hiermee wordt de transitie naar waterstof vergemakkelijkt, omdat de vraag naar waterstof groter is.

Bottlenecks

Op dit moment zijn de kosten van een aandrijving op waterstof nog te hoog en zijn er nog teveel technische en praktische obstakels om deze technologie grootschalig op de markt te zetten. Daarnaast zal er, parallel aan de verdere ontwikkeling van de technologie, een waterstof infrastructuur aangelegd moeten worden. Dit kost veel geld en een zeer goede planning is vereist om het “kip-ei” principe tegen te gaan.

Hieronder volgt een overzicht van een aantal veel genoemde bottlenecks:

Gerelateerd aan technologie ontwikkeling

Verhoging R&D budget is noodzakelijk om technologie marktklaar te maken, onder andere:

- Kosten reductie van fuel cell, aandrijflijn en productie van waterstof
- Vergroten van actieradius voertuig waarbij de energiedichtheid van opslagmedia een grote rol speelt.
- Levensduur van de brandstofcel verhogen

Gerelateerd aan infrastructuur ontwikkeling en waterstof productie

- Investeren in waterstof infrastructuur:
De aanleg van waterstof infrastructuur is een kritisch pad. Hierbij speelt het kip-ei principe een grote rol: het op de markt zetten van fuel cell voertuigen en het investeren in infrastructuur zal ongeveer gelijktijdig moeten gebeuren. Naast het gebruik van waterstof in fuel cells, zou het goed kunnen zijn om bijvoorbeeld in het beginstadium verbrandingsmotoren op waterstof (bijvoorbeeld in bi-fuel motoren) ook te stimuleren waardoor de vraag naar waterstof hoger wordt en dus de investering in een waterstof infrastructuur eerder rendabel wordt.
Het belastingvrij houden van waterstof speelt in de initiële fase een cruciale rol omdat onderbelasting van het waterstofnetwerk een negatief effect heeft op de winstgevendheid ervan, waardoor marktpartijen hierin niet zullen investeren.
- Investeer in duurzame methoden om waterstof te produceren:
Waterstof is zo schoon als de methode waarmee het gemaakt wordt. Bijvoorbeeld: waterstof uit zonne- of windenergie leveren totaal geen CO₂ uitstoot op, uit biomassa: 22 g CO₂ / MJ, uit natural gas: 108 g CO₂/MJ en uit EU mix elektriciteit 230 g CO₂/MJ!

Bronnen

[1] Bruijn, The hydrogen economy, possibilities and limitation, ECN-RX--05-070, februari 2005

[2] Concawe, EUCAR, EC JRC, Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context, Version 2c, maart 2007

[3] Falk, Strobl, Eichlseder and Wimmer, Potentials of the hydrogen combustion engine with innovative hydrogen-specific combustion process, 2004

[4] Hyways, The European Hydrogen Roadmap, <http://www.hyways.de/>, 6th Framework Programme [contract N° 502596], februari 2008

[5] Menkveld, Energie technologieën in relatie tot transitiebeleid, ECN-C--04-020, februari 2004

[6] Uytendinck, Hanschke, Kroon, Effecten en kosten van duurzame innovatie in het wegverkeer, ECN-E—07-106, maart 2008

A.4 Voertuigverbeteringen (alle voertuigen)

Reductiepotentieel

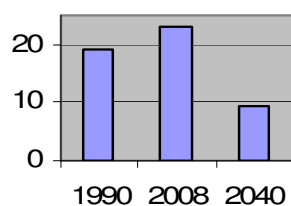
Totaal aan voertuigmaatregelen: 25-30% reductie.

Dit is opgebouwd uit:

- Banden met lage rolweerstand 3% (verplicht vanaf 2012): 3% op voertuigbasis [EU op basis TNO onderzoek]
- Bandspanningsmonitoring (verplicht vanaf 2012): 2,5% op voertuigbasis [EU op basis TNO onderzoek]
- Verbeterd rijgedrag: 10% op voertuigbasis [Het Nieuwe Rijden]
- Advanced Driver Assist (ADA): 10-15% [TNO, eImpact]
Let op: niet optellen bij HNR! (effecten overlappen deels)
- Verbetering aerodynamica: 0-5%
- Lichtgewicht: 10-15%
Let op: hogere CO₂ uitstoot bij fabricage (bij hoge sterkte stalen) moet wel in de hand gehouden worden.

Daarnaast geeft het gebruik van kleinere voertuigen - indien dit echt doorzet - een groot effect. In deze studie is daar geen verdere inschatting van gemaakt. Dit is wel een belangrijke factor voor robuustheid!

Deze componenten zorgen voor de reductie van CO₂ uitstoot door personenauto's van 19 Mton in 1990 naar 9,5 Mton in 2040, ondanks de forse groei in vervoersprestatie.



Figuur 2.1: CO₂ uitstoot personenauto's (in miljoen ton)

B Bestelauto's en vrachtauto's (distributie en lange afstand)

B.1 Bestelwagens en distributie en lange-afstand vrachtwagens met dieselmotoren

Maatregelen om het energieverbruik te verminderen in een aandrijflijn met dieselmotor kunnen opgedeeld worden in twee groepen:

1. vermindering behoefte aan mechanische energie:
 - gewichtsreductie, verlaging rolweerstand en verlaging luchtweerstand
2. efficiënter maken van motor en aandrijflijn:
 - verbetering motorrendement door o.a. down-scaling en uitlaatgasenergie-terugwinning
 - verbetering van de transmissie, zoals een optimale automatische versnellingsbak
 - hybride elementen, zoals idle shut-down (vermijden stationair draaien), remenergieterugwinning en acceleratieondersteuning.

Reductiepotentieel

Het reductiepotentieel is middels een beperkte analyse geschat met een model waarvan de resultaten zijn weergegeven in tabel 1

Tabel 1: Projectie energiebesparing bij bestelwagens en vrachtwagens

	input - randvoorwaarden			output			output		
	Bestelwagens	distributie		Vermindering voertuig energieconsumptie			Index voertuig energieconsumptie		
		truck <15 ton	long-haul truck	Bestelwagens	truck <15 ton	long-haul truck	Bestelwagens	truck <15 ton	long-haul truck
Daling behoefte mechanische energie									
gewichtsreductie	20%	15%	15%	8%	7%	5%	0,85	0,85	0,76
banden rolweerstand	25%	25%	25%	8%	10%	14%	0,92	0,93	0,95
luchtweerstand	15%	15%	20%	5%	4%	7%	0,93	0,91	0,86
airco	-5%	-5%	0%	5%	4%	7%	0,96	0,96	0,93
				-5%	-5%	0%	1,05	1,05	1,00
Motor / aandrijving efficiënter							0,56	0,63	0,71
motor, incl verbetering auxiliaries	21%	16%	20%	21%	16%	20%	0,79	0,84	0,80
transmissie (optimale automatische transmissie)	12%	11%	7%	12%	11%	7%	0,88	0,89	0,93
start-stop	100%	100%	100%	10%	6%	4%	0,90	0,94	0,96
hybride (in additie tot transmissie + start-stop)	10%	10%	0%	10%	10%	0%	0,90	0,90	1,00
Totaal index energiebehoefte max haalbaar							0,48	0,54	0,54
Implementatie-factor (% vd trucks die dit heeft)	75%	75%	75%						
Totaal index (brandstof) energiebehoefte gemiddeld							0,61	0,65	0,66
Besparing							39%	35%	34%
gemidd. belading % voertuiggewicht	50%	50%	75%						
<u>Energie verdeling 2008</u>									
luchtweerstand	30%	24%	37%						
rolweerstand	30%	38%	56%						
acceleraties	32%	32%	3%						
idle (normaal verkeer)	10%	6%	4%						
waarvan Idle (op parkeerplaats)			2%						
	102%	100%	100%						

Daarnaast is het belangrijk om lucht- en rolweerstand zoveel mogelijk terug te dringen. Essentieel voor het komen tot de nieuwe voertuigmix is inzicht in het precieze gebruiksprofiel van de voertuigen en de statistische verdeling. Op die manier kan een indeling gemaakt worden naar verschillende categorieën (met voldoende volume) waarvoor de fabrikanten dan voertuigen kunnen ontwikkelen en optimaliseren.

In het model wordt globaal rekening gehouden met het gebruikspatroon (via energieverdeling naar luchtweerstand, rolweerstand, acceleratie-energie, stationair draaien tijdens stilstand (idle)).

Volgens deze analyse is het maximaal haalbare reductiepercentage ca 50%. Dit indien alle maatregelen geïmplementeerd worden en ook de beoogde besparing opleveren. Als uit wordt gegaan van een implementatie van 75% op de voertuigkilometers (er rekening mee houdend dat het voertuigpark in 2040 een bepaalde leeftijdsverdeling zal hebben) dan is de totale besparingsmogelijkheid geschat op 39% voor de bestelwagens tot 34% voor de long-haul trucks. Een overzicht is gegeven in Tabel 2. Dit zal wel maatregelen vereisen in de vorm van wettelijke maatregelen en stimulering van ontwikkeling. Het eventuele gebruik van biobrandstoffen of elektrisch energie is hierin niet meegerekend. Vermeld wordt dat de besparingen nu ingeschat zijn op basis van consultatie van specialisten binnen TNO en op basis van eenvoudige aannames ten aanzien van het gebruikspatroon van de voertuigen. Aanbevolen wordt vervolgonderzoek te doen, inclusief consultatie van externe specialisten, fabrikanten en toeleveranciers.

Tabel 2: Overzicht projectie mogelijk energiebesparing tussen nu en 2040 (bij juiste wettelijke maatregelen). In de technologisch haalbare doelstelling is gerekend met 100% implementatie (linker kolom).

	Max. energiebesparing	Energiebesparing bij 75% implementatie
Bestelwagens	52%	39%
Distributie vrachtwagens < 15 ton	46%	35%
Lange afstand vrachtwagens	46%	34%

Kort wordt ingegaan op de verschillende aspecten:

- **Gewichtsreductie:** uitgegaan wordt van een reductie met 15 tot 20%. Dit is een van de lastigere doelen, omdat een vrachtwagen degelijk moeten zijn en om moet kunnen gaan met heel verschillende beladingstypen. Bij OV bussen kan met een composiet structuur een gewichtsreductie van meer dan 20% gerealiseerd worden. Daarom wordt ervan uit gegaan dat dit ook op langere termijn voor vrachtwagens wel haalbaar is.
- **Rolweerstand banden:** Besparing van rond de 25% lijkt haalbaar uitgaande van presentaties van de bandenindustrie. Ook het wegdektype speelt een grote rol in de rolweerstand en zal in de toekomst mede geanalyseerd moeten worden. Naast eerste montage banden zullen uiteraard ook vervangingsbanden dezelfde prestaties moeten leveren.

Efficiënter maken van motor en aandrijflijn:

- Verlaging inwendige wrijving: dit kan o.a. door het verhogen van het specifiek vermogen.
- Voor de lange afstand truck wordt uitgegaan van een terugwinning van energie uit de uitlaatgassen middels een stoom turbine (gesloten Rankine cyclus).
- Start-stop system: dit betekent dat de motor direct uitgeschakeld wordt als een voertuig stop. Deze systemen worden nu al geïnstalleerd op enkele personenwagens.
- Optimale (automatische) versnellingsbak: er kan brandstof bespaard worden, omdat de motor gemiddeld minder toeren draait (daardoor minder inwendige wrijvingsverliezen).
- Hybride: door terugwinning van remenergie en acceleratieondersteuning kan energie bespaard worden. De additionele besparing is hier relatief beperkt (10% voor bestelwagen en distributietruck), omdat een flink deel van de besparing al is meegerekend via de optimale transmissie en het start-stop systeem.

Bottlenecks:

- Rendementsverhoging van de motor zelf zou de bottleneck kunnen zijn. De rankine cyclus (stoomturbine) voor terugwinning energie in uitlaatgassen moet zich nog bewijzen ook in praktische zin (de verdamper-warmtewisselaar in uitlaatgassen is de kritische component en de ruimte aan boord van de lange-afstandtruck is beperkt).
- Kosten: vooral de verbetering van de aerodynamica van het voertuig en de gewichtsverlaging zouden kunnen leiden tot een substantiële kostenverhoging.

B.2 Elektrische distributie vrachtwagens

Het energieverbruik van een elektrische distributietruck is geschat; zie Tabel 3. De benodigde mechanische energie aan de wielen is globaal geschat op ca 2 MJ/km. Dit is op basis van hetzelfde geoptimaliseerde voertuig als het voertuig met dieselmotor (dus gewicht, lucht- en rolweerstand geoptimaliseerd). Het is belangrijk om de benodigde mechanische energie middels simulatieberekeningen en/of metingen of middels literatuuronderzoek nauwkeuriger te bepalen (voor het juiste inzetprofiel).

Tabel 3: Distributie truck (<15 ton) met elektrische aandrijving

	MJ / km
Benodigde mechanisch energie aan de wielen	2.21
E motor rendement	0.9
Controle module	0.97
ontladen batterij	0.96
laden batterij	0.96
Laadapparaat	0.92
Energie uit het net	2.98

Op basis van tabel 3 is een vergelijking gemaakt tussen een sterk geoptimaliseerde truck met dieselmotor en een elektrische truck.. Zie tabel 4.

Tabel 4: Vergelijking diesel en elektrische truck in 2040

2040 distributie truck < 15 ton	TTW Energieverbruik [MJ/km]	TTW CO ₂ g/km	WTT CO ₂ g/km	WTW CO ₂ g/km
dieselmotor geoptimaliseerd	5,8	432	-40	392
Elektrisch	3,56	0	427	427

Uit tabel 4 blijkt dat er geen groot verschil is tussen de Well to Wheel CO₂ emissies van conventionele en elektrische distributie vrachtwagens voor in 2040. Het verschil is vooral afhankelijk van het aandeel renewable grondstof in de productie van dieselbrandstof of het aandeel renewable grondstof in elektrische energie. Voor deze vergelijking is uitgegaan van een aandeel 30% renewable grondstof in diesel, respectievelijk 20% voor elektriciteit.

Bottlenecks

De energie-opslag (accu's) is de enige bottleneck voor elektrische voertuigen. Hier is nog een grote doorontwikkeling nodig om de juiste energiedichtheid en levensduur te realiseren.

B.3 Beleidsmaatregelen overheid:

Nationaal:

- Druk op EC voor ontwikkeling van CO₂ en/of energieconsumptie wetgeving voor trucks.
- Bewaking voortgang technische vooruitgang (CO₂ vermindering) trucks (voor Nederlandse situatie) tussen nu en 2040.
- Stimulering ontwikkeling en demonstratie van de technologieën om energie te besparen. Sommige Nederlandse bedrijven kunnen een sleutelrol vervullen.

Internationaal:

- Ontwikkeling lange termijn wetgeving voor CO₂ emissie en/of energieconsumptie voor trucks (inclusief in gebruik aspecten zoals bewaking bandenspanning en specificaties van vervangingonderdelen zoals banden). Richting de industrie zal een goede onderbouwing van het overheidsbeleid nodig zijn inclusief een onderbouwing van de mogelijke energiebesparing.
- Stimulering van ontwikkeling en demonstratie van de technologieën om energie te besparen (via EU programma's).

C Bussen

C.1 Bussen met diesel- en aardgasmotoren

C.1.1 Reductiepotentieel

Maatregelen om het energieverbruik te verminderen in een aandrijflijn met diesel- of aardgasmotor kunnen opgedeeld worden in twee groepen:

1. vermindering behoefde aan mechanische energie:
 - gewichtsreductie, verlaging rolweerstand en verlaging luchtweerstand
2. efficiënter maken van motor en aandrijflijn:
 - verbetering motorrendement door o.a. down-sizing en uitlaatgas energierugwinning
 - verbetering van de transmissie, zoals een optimale automatische versnellingsbak
 - hybride elementen, zoals idle shut-down (vermijden stationair draaien), remenergieterugwinning en acceleratieondersteuning.

Het reductiepotentieel is middels een beperkte analyse geschat met een model waarvan de resultaten zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Projectie energiebesparing bij bussen

	input - randvoorwaarden	output	output
		Vermindering voertuig energieconsumptie	Index voertuig energieconsumptie
	bus	bus	bus
Daling behoefte mechanische energie			0.84
gewichtsreductie	20%	11%	0.89
banden rolweerstand	25%	9%	0.91
luchtweerstand	15%	2%	0.98
airco	-5%	-5%	1.05
Motor / aandrijving efficiënter			0.54
motor, incl verbetering auxilliaris	16%	16%	0.84
transmissie (optimale automatische transmissie)	20%	20%	0.80
hybride	20%	20%	0.80
Totaal index energiebehoefte max haalbaar			0.45
Implementatie-factor (% vd bussen die dit heeft)	75%		
Totaal index (brandstof) energiebehoefte gemiddeld			0.59
Besparing			41%
gemidd. belading % voertuiggewicht	50%		
<u>Energie verdeling 2008</u>			
luchtweerstand	15%		
rolweerstand	35%		
acceleraties	44%		
idle	6%		
	100%		

In het model wordt globaal rekening gehouden met het gebruikspatroon (via energieverdeling naar luchtweerstand, rolweerstand, acceleratie-energie, stationair draaien tijdens stilstand (idle)).

Volgens deze analyse is het maximaal haalbare reductiepercentage ca. 55%, indien alle maatregelen geïmplementeerd worden en ook de beoogde besparing opleveren. Als wordt uitgegaan van een implementatie van 75% op de voertuigkilometers (er rekening mee houdend dat het voertuigpark in 2040 een bepaalde leeftijdsverdeling zal hebben) dan is de totale besparingsmogelijkheid geschat op 41% voor bussen. Een overzicht is gegeven in Tabel 2. Dit zal wel maatregelen vereisen in de vorm van wettelijke maatregelen en stimulering van ontwikkeling. Het eventuele gebruik van biobrandstoffen of elektrische energie is hierin niet meegerekend. Vermeld wordt dat de besparingen nu ingeschat zijn op basis van consultatie van specialisten binnen TNO en op basis van eenvoudige aannamen t.a.v. het gebruikspatroon van de voertuigen. Aanbevolen wordt vervolgonderzoek te doen, inclusief consultatie van externe specialisten, fabrikanten en toeleveranciers.

Tabel 2: Overzicht projectie mogelijk energiebesparing tussen nu en 2040 (bij juiste wettelijke maatregelen). In de technologisch haalbare doelstelling is gerekend met 100% implementatie (linker kolom).

	Max. energiebesparing	Energiebesparing bij 75% implementatie
Bussen	55%	41%

Kort wordt ingegaan op de verschillende aspecten:

- Gewichtsreductie: uitgegaan wordt van een reductie van 20%. Bij OV bussen kan met een composiet structuur een gewichtsreductie van meer dan 20% gerealiseerd worden.
- Rolweerstand banden: Besparing van rond de 25% lijkt haalbaar uitgaande van presentaties van de bandenindustrie. Ook het wegdektype speelt een grote rol in de rolweerstand en zal in de toekomst mede geanalyseerd moeten worden. Naast eerste montage banden zullen uiteraard ook vervangingsbanden dezelfde prestaties moeten leveren.

Efficiënter maken van motor en aandrijflijn:

- Verlaging inwendige wrijving: dit kan o.a. door het verhogen van het specifiek vermogen.
- Voor bussen wordt uitgegaan van een terugwinning van energie uit de uitlaatgassen en/of EGR gassen middels een gesloten Rankine cyclus (verdamping van vloeistof onder hoge druk en vervolgens expansie over een turbine).
- Optimale (automatische) versnellingsbak: er kan brandstof bespaard worden, omdat de motor gemiddeld minder toeren draait (daardoor minder inwendige wrijvingsverliezen).
- Hybride: door terugwinning van remenergie en acceleratieondersteuning kan energie bespaard worden. De additionele besparing is hier relatief beperkt (20% voor bussen), omdat een flink deel van de besparing al is meegerekend via de optimale transmissie en motor.

Bottlenecks:

- Rendementsverhoging motor zelf zou bottleneck kunnen zijn. De rankine cyclus (stoomturbine) voor terugwinning energie in uitlaatgassen moet zich nog bewijzen ook in praktische zin (de verdamper-warmtewisselaar in de uitlaatgassen is de kritische component en de ruimte aan boord is beperkt).
- Kosten: vooral de verbetering van de aerodynamica van het voertuig en de gewichtsverlaging zouden kunnen leiden tot een substantiële kostenverhoging.

C.1.2 Beleidsmaatregelen overheid:**Nationaal:**

- Druk op EC voor ontwikkeling van CO₂ en/of energieconsumptie wetgeving voor bussen.
- Bewaking voortgang technische vooruitgang (CO₂ vermindering) bussen (voor Nederlandse situatie) tussen nu en 2040.
- Stimulering ontwikkeling en demonstratie van de technologieën om energie te besparen. Sommige Nederlandse bedrijven kunnen een sleutelrol vervullen.

Internationaal:

- Ontwikkeling lange termijn wetgeving voor CO₂ emissie en/of energieconsumptie voor bussen (inclusief in gebruik aspecten, zoals bewaking bandenspanning en specificaties van vervangingonderdelen zoals banden). Richting de industrie zal een goede onderbouwing van het overheidsbeleid nodig zijn inclusief een onderbouwing van de mogelijke energiebesparing.
- Stimulering van ontwikkeling en demonstratie van de technologieën om energie te besparen (via EU programma's).

D Binnenvaart

D.1.1 *Conclusie*

Er zijn nu reeds voorbeelden van geoptimaliseerde scheepsonwerpen met diverse van de hier onder beschreven technologieën, met een naar schatting 25-30% lager brandstofverbruik, waarbij de meerkosten in 2 jaar zijn terugverdiend.

Al met al wordt 30 á 40% reductiedoelstelling (2040 t.o.v. 1990) in deze sector haalbaar geacht.

D.1.2 *Aangrijpingspunten*

In het algemeen zijn er veel mogelijkheden om de energie efficiency van binnenvaartschepen te vergroten. De innovatiegraad is niet hoog, als gevolg van het type sector: veel kleine reders, lange levensduur schepen, vaak kleine marges. Brandstofkosten maken zo'n 20 tot 25% uit van de vrachtprijs. De huidige trend van stijgende brandstofkosten zullen de implementatie van efficiëntere technieken dichterbij brengen. De verwachting is dat op de lange termijn (2040) aanzienlijke besparingen in brandstofverbruik en CO₂ reductie gerealiseerd zullen worden, mits daarvoor een aantal beleidsopties worden ingezet.

De aangrijpingspunten voor technologische maatregelen bij binnenvaartschepen zijn grofweg in drie groepen te verdelen (met schatting bijdrage):

1. Aandrijving en brandstoffen (60%)
2. Snelheidsregeling (20%)
3. Hydrodynamische optimalisatie (20%)

Ad 1. Aandrijving en brandstoffen

Verdere optimalisatie van dieselmotoren voor schepen is mogelijk. Er zijn mogelijkheden, die variëren van het verminderen van de interne wrijving van de motor tot "waste-heat recovery", het terugwinnen van energie uit de uitlaatgassen en/of EGR gassen van de motor. Waste-heat recovery kan middels de gesloten Rankine cyclus. Hierbij wordt een vloeistof op druk gebracht en verdampt met behulp van de warmte in de uitlaatgassen. Vervolgens expandeert de damp over in turbine en wordt mechanische energie opgewekt. Deze energie kan omgezet worden in elektrische energie en in eerste instantie gebruikt worden voor het boordverbruik en voor de hulpaggregaten.

Al met al lijkt op dit gebied een efficiencyverbetering van 15% haalbaar. Vanwege de lange levensduur van schepen kan het de moeite waard zijn om in de toekomst bestaande dieselmotoren te vervangen door deze nieuwe veel zuinigere motoren, die ook een veel lagere uitstoot aan NO_x en PM ("fijn stof") zullen hebben, waardoor bijgedragen wordt aan verbetering van de lokale luchtkwaliteit. Naast de zuinige motor is het belangrijk om de schroef optimaal af te stemmen op de motorgrootte.

Toepassing van biobrandstoffen in de binnenvaart is (nog) niet evident. Er zijn eerder risico's van waterscheiding en bacteriegroei en daarnaast is in het schip het verwarmingssysteem aangesloten op de dieselolie. De brandeigenschappen kunnen veranderen, ook bij vrij lage blends van FAME (biodiesel). Verder zijn misschien niet alle materialen bestand tegen FAME in wat hogere blend percentages. Vooral wordt voor de binnenvaart fossiele brandstoffen aanbevolen, met eventueel een blend met biodiesel tot maximaal 5%. Tweede generatie duurzame diesel zoals NexBTL of

BTL kan wel in hogere blends toegepast worden. Nadere studie naar de toepassing van biobrandstoffen in de binnenvaart wordt aanbevolen.

Voor speciale toepassingen kan een diesel-elektrische aandrijving overwogen worden. Dit heeft veel besparingspotentieel, met name als het schip geen standaard belastingprofiel heeft. Een belangrijk voordeel is dat de vorm van het schip verder geoptimaliseerd kan worden, hetgeen de vaarweerstand vermindert. Deze toepassing wordt ook wel All Electric Ship (AES) genoemd. Een set dieselgeneratoren wekt elektriciteit op waarmee de schroeven worden aangedreven. Met een powermanagement systeem wordt de vermogenshuishouding geoptimaliseerd. De belastinggraad van de dieselgeneratoren kan worden geoptimaliseerd op zeer efficiënt (stationair) gebruik. Indien weinig vermogen wordt afgenomen kunnen generatoren worden afgeschakeld. De schroefaandrijving kan gemakkelijk worden geoptimaliseerd, bijv. door toepassing van roerpropellers.

Een bijkomend voordeel is flexibiliteit in de plaatsing van de generatoren, waardoor onder meer de scheepsvorm geoptimaliseerd kan worden. Deze flexibiliteit heeft ook praktische voordelen, zoals (tijdelijke) plaatsing aan dek e.d..

Voordeel van het AES concept is ook nog dat gemakkelijk andere energiebronnen (zonnecellen, windenergie, brandstofcellen) kunnen worden toegevoegd. In bepaalde toepassingen kan dit leiden tot een volledige elektrificatie, zonder of met incidenteel gebruik van dieselgeneratoren.

Ad 2. Snelheidsregeling

Bij binnenvaartschepen is het brandstofverbruik sterk afhankelijk van factoren als: stroming (stroomopwaarts of stroomafwaarts), waterdiepte, sluisen etc.

Door het optimaliseren van het snelheidsprofiel tijdens een vaart op bovengenoemde factoren is een significante energiebesparing mogelijk. Een adviserende tempomaat levert bijvoorbeeld een besparing van 4-12% afhankelijk van het type vervoer.

Ad 3. Hydrodynamische optimalisaties

De scheepsvorm en ruwheid van de scheepshuid bepalen de waterweerstand en daarmee het brandstofverbruik. Aanpassing van de scheepsvorm aan het type gebruik levert besparing op, alsmede speciale non-stick coatings voor verlaging van de ruwheid van de scheepshuid.

Er zijn diverse mogelijkheden voor schroefoptimalisatie: betere aanpassing aan de motor, contra-roterende scheepspropellers, tipplaatschroeven, oppervlakteschroeven e.d. Al met al kunnen hydrodynamische optimalisaties naar schatting 10-15% besparing opleveren.

D.1.3 Beleidsopties voor deze sector

- Informatievoorziening aan de sector over brandstofbesparende opties, terugverdiertijden etc.
- Subsidiëring/financiering ombouw/upgrades schepen en scheepsaandrijving.
- Studie naar de mogelijkheden van toepassing van biobrandstoffen in de binnenvaart.
- In overleg met de motorfabrikanten komen tot wettelijke eisen met betrekking tot een sterke daling van het brandstofverbruik op de lange termijn.

E Spoor (personen- en goederenvervoer)

Let op: Bij totale CO₂ emissies in Mton, zijn alleen de emissies van dieseltreinen meegeteld (doordat de bijdrage spoor aan IPCC emissies op basis van TTW is). Aangezien bij deze sector (als enige in de sector vervoer) de WTT emissies veel groter zijn dan TTW emissies (ook al in 1990 en 2010), is er alsnog een correctie nodig voor WTT deel elektrische treinen!

E.1.1 *Conclusie*

Een zeer ruwe schatting voor haalbare energiereductie bij treinen in 2040 (ten opzichte van 1990) is 30%.

Doordat het grootste deel (73%) van het Nederlandse railnet geëlektrificeerd is, is reeds sprake van een relatief efficiënte aandrijvingsvorm. Hierdoor zijn de reductie mogelijkheden aanzienlijk beperkter dan bij wegvoertuigen en schepen, zeker waar het gaat om personenvervoer. Emissiereductie zal hier voor een belangrijk deel gehaald worden door verbeteringen bij de elektriciteitsproductie als gevolg van het ETS. Elektrificatie van delen van het net die nu nog niet zijn (veelal lijnen in de regio met een lage vervoersdichtheid) zal in veel gevallen uit financieel oogpunt niet voor de hand liggen.

Bij het goederenvervoer wordt vaak nog wel gebruik gemaakt van dieseltractie, ook over het geëlektrificeerde net. De bijdrage van dieseltreinen aan de totale CO₂-emissies is echter zeer klein (EU: 0,5%), zodat hier niet de prioriteit zal liggen. Desalniettemin heeft Europese railsector bij monde van de CER (Community of European Railway and Infrastructure Companies) onlangs een CO₂ reductiedoelstelling van 30% neergezet voor de periode 1990-2020. Verdere reducties in deze sector zullen naar verwachting zeer beperkt zijn.

E.1.2 *Aangrijpingspunten*

Algemeen geldt dat elektrificatie van het railvervoer een positieve bijdrage levert. Verdere technologische mogelijkheden zijn:

- verder optimaliseren van de terugwinning van remenergie, rangeerlocomotieven met hybride aandrijving e.d.
- Moderniseren van de vloot en upgraden van locomotieven.
- Verbetering van operationele procedures draagt eveneens bij, bijvoorbeeld energie efficiënt rijden (“eco-driving”), ondersteund door slimme adviessystemen.

E.1.3 *Beleidsopties voor deze sector*

Waar mogelijk verder elektrificeren van spoorvervoer.

F Overzicht Nederlandse bedrijven actief in de zuinige voertuigaandrijving

Overzicht juni 2008 (niet uitputtend)

Motoren

- DAF Trucks: zeer schone en zuinige vrachtwagenmotoren
- Gomecsys: technologie voor variabele compressieverhouding
- NoNOx: gasmotortechnologie voor verlaging NOx uitstoot

Voertuigen

- APTS: Phileas, bus met hybride aandrijving
- Soios/Duvedec: Solar road train, door zonne-energie aangedreven elektrisch voertuig voor de toeristische sector
- Gemco: dieselektrisch stadsdistributievoertuig
- Spijkstaal: o.a. elektrische bussen
- B-Style: hybride variant op bussen
- VDL, diverse bussen
- DuraCar: producent elektrisch aangedreven lichtgewicht voertuigen (QUICC)
- ECE/Electric Car Europe: ombouw en importeur elektrische voertuigen (o.a. Detroit Electric).

Alternatieve aandrijvingen

- Bosch VDT: Continu Variabele Transmissies
- Drivetrain Innovations: modules voor versnellingsbakken, gebaseerd op "Zero Inertia"
- CCM: vliegwielen
- e-Traction: elektrische naafaandrijving voor bussen
- Alphatron Electronic Parts: ultra-capacitors
- Nedstack: fuel cells
- Govers: Constant-Speed Power Take-Off (voor koeling)
- SKF: intelligente lagers in efficiënte aandrijvingen
- Formula Zero: hybride kart met brandstofcel en supercaps
- EPYON: laadsystemen voor elektrische voertuigen

Systemen voor gasvormige brandstoffen

- Teleflex GFI
- Vialle
- Prins

Brandstoffen leveranciers

- Shell
- BK-Gas
- Chevron/Oronite

ITS-systemen

- TomTom: navigatie
- Groeneveld: radar voor ACC
- Technolution
- ARS T&TT

- Peek Traffic
- Vialis

R&D

- TNO Industrie en Techniek: Diesel emissie reductie, alternatieve brandstoffen, hybride aandrijvingen
- ECN: brandstofceltechnologie en -toepassingen
- Technische universiteit Eindhoven: motorenonderzoek, alternatieve aandrijvingen
- Hogeschool Arnhem Nijmegen: o.a. brandstofcelvoertuigen