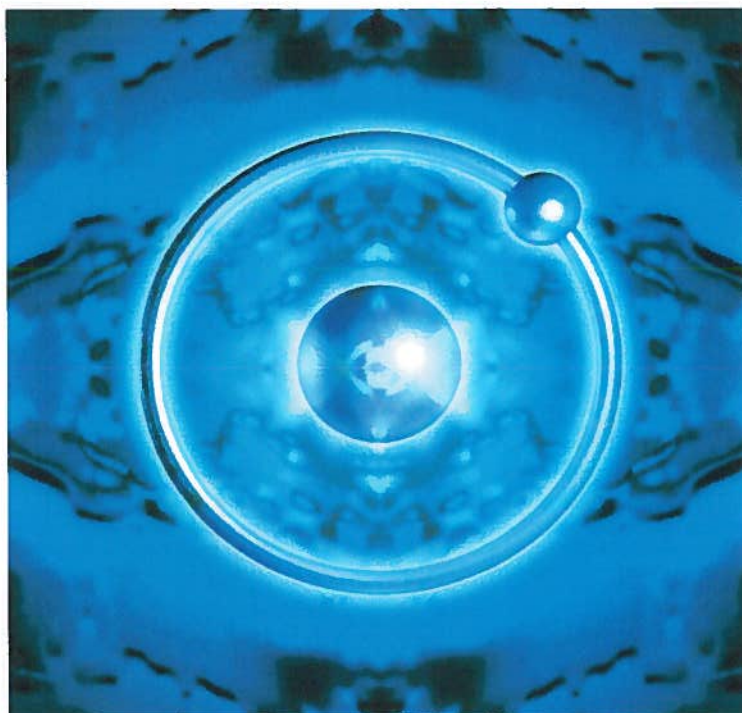


Waterstoftechnologie in het Nederlandse personenvervoer

Sociotechnische scenario's als instrument voor transitiebeleid

Matthijs ten Hoedt

JANUARI 2006



Waterstoftechnologie in het Nederlandse personenvervoer

Sociotechnische scenario's als instrument voor transitiebeleid

Matthijs ten Hoedt

JANUARI 2006

Universiteit van Twente

Wijsbegeerte van Wetenschap, Technologie en Samenleving

Leerstoel Filosofie van Wetenschap en Techniek

Afstudeercomissie:

Dr. A. A. de la Bruheze	Universiteit Twente Bedrijf, Bestuur en Technologie, Leerstoel Filosofie van Wetenschap en Techniek
Dr. Ir. B. Elzen	Universiteit Twente Bedrijf, Bestuur en Technologie, Leerstoel Filosofie van Wetenschap en Techniek
Dr. R. Hoogma	SenterNovem
Dr. D. Stermerding	Universiteit Twente Faculteit Bedrijf Bestuur en Technologie, Leerstoel Filosofie van Wetenschap en Techniek

Voorwoord

Sinds ik mijn eerste Science Fiction boek heb gelezen fascineert het mij mateloos hoe een toekomst geschetst kan worden. Hoe kun je vanuit huidige kaders een beeld vormen van de maatschappij over vijftig jaar? Ik aarzelde dan ook geen moment toen ik bij de leerstoel Filosofie van Wetenschap en Technologie de mogelijkheid kreeg om een afstudeeronderzoek te doen naar de bruikbaarheid en de uitkomsten van de door haar ontwikkelde scenariomethode bij het oplossen van de problemen in het personenvervoer met name door inzet van waterstoftechnologie, de brandstof van de toekomst. Een prachtige opdracht om mijn nieuwsgierigheid naar de toekomst te bevredigen.

Een afstudeeronderzoek is een enorm leerproces waarbij je niet alleen je kennis vergroot maar ook je algemene vaardigheden verbetert. Voor mij gold dat met name voor het omgaan en het verzamelen van empirische informatie. In verschillende curriculaonderdelen van de studie wordt aandacht besteed aan deze vaardigheid maar daarbij wordt een helder doel aangeboden. Tijdens het afstudeeronderzoek bepaal je zelf het doel en daarmee de informatie die je nodig hebt. Dat stelt je voor tamelijk intensieve schiftingsprocessen. Het personenvervoer en waterstoftechnologie waren voor mij nieuwe onderzoeksterreinen. In het begin heb ik geprobeerd om een globaal beeld te krijgen van deze materie om later gericht te kunnen zoeken naar ontbrekende details. Het bleek al snel dat de empirische informatie over waterstoftechnologie en personenvervoer in enorme hoeveelheden beschikbaar is: tik bij Google.com eens het woord 'hydrogen' in, en zie het resultaat van circa 42 miljoen hits. Ergens in het onderzoek moet je dan besluiten dat je voldoende informatie hebt verzameld en kunt stoppen met het verzamelen van interessante feitjes.

Naast dit leren omgaan met empirische informatie heb ik veel geleerd over de presentatie van de informatie. Het contrast tussen Elektrotechniek en WWTS komt hierbij duidelijk naar voren. Voor Elektrotechniek vormen tabellen, formules en figuren de basis van de presentatie en speelt de tekst eromheen een meer illustratieve rol. Voor WWTS is dit precies omgekeerd, waardoor het belangrijk wordt om op de formulering van zinnen te letten. Dit betekent in de praktijk dat je in zo min mogelijk woorden vertelt wat je kwijt wilt, zonder dat die informatie op andere manieren geïnterpreteerd kan worden. Een kunst die veel oefening vereist!

Naast de algemene vaardigheden doe je tijdens het afstudeeronderzoek ook meer specifieke ervaring op. Zo beheers ik verschillende begrippen en methodieken beter, zoals regime, niche, landschap, transitie en sociotechnische scenario's. Daarnaast heb ik in de afgelopen twee jaren de ontwikkelingen in het personenvervoer nauwlettender gevolgd dan ik zonder dit onderzoek zou hebben gedaan.

Het doen van het onderzoek en het schrijven van deze scriptie was niet mogelijk zonder de hulp en bijdrage van verschillende mensen. Allereerst wil ik alle personen bedanken die ik voor mijn scriptie heb mogen interviewen. Zij hebben mij laten zien hoe in de praktijk over de problemen en ontwikkelingen in het personenvervoer en waterstoftechnologie

wordt nagedacht. Ten tweede wil ik mijn vriendin Miranda en mijn ouders bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun (geestelijk, maar ook met het becommentariëren van geschreven stukken). Zonder hen was ik waarschijnlijk een kluizenaar geworden in de greep van scenario's en waterstoftechnologie of de eeuwige student, die zijn fascinatie voor een onderwerp niet kon omzetten in een scriptie. En last but not least wil ik mijn afstudeerbegeleiders bedanken voor het veelvuldig doorploeteren van stapels papier en de suggesties om deze afstudeerscriptie naar een hoger niveau te tillen.

Matthijs ten Hoedt, februari 2006

Samenvatting

In deze afstudeerscriptie is met behulp van de methodiek voor Sociotechnische Scenario's (STSc) een tweetal transitiepaden voor waterstoftechnologie verkend en op basis daarvan zijn beleidsadviezen aan de overheid geformuleerd. Deze verkenning heeft in een aantal stappen plaatsgevonden.

In de hoofdstukken 3 tot en met 5 is een inventarisatie gemaakt van de lopende ontwikkelingen, problemen en trends op regime-, niche- en landschapsniveau. Deze inventarisatie is gebruikt om meer inzicht te krijgen in het personenvervoer, maar ook om de scenario's te kunnen ontwerpen die aansluiten op de lopende ontwikkelingen.

In hoofdstuk 6 is vervolgens stap voor stap aangegeven hoe de scenario's ontworpen zijn en welke keuzes gemaakt zijn. Een belangrijke karakteristiek voor de ontworpen scenario's is dat er twee verschillende type overheden neergezet zijn, namelijk: een overwegend economisch-liberale overheid (zie hoofdstuk 7) en een meer sturende overheid (zie hoofdstuk 8). Door de rol van de overheid te variëren ontstaat een beter beeld van wat de invloed van de overheid op het transitiepad is en daarmee kunnen beleidsadviezen geformuleerd worden.

In de scenario's ontstonden verschillende transitiepaden mede door de verschillen in de rol die de overheden speelden. De economisch-liberale rol van de overheid uit scenario 1 leidde tot een hightech variant van het bestaande personenvervoer. Dit betekent dat de huidige technologieën in het regime vervangen zijn door verbeterde of nieuwe technologieën, maar dat voor de rest er weinig veranderd is op het sociale vlak. De sturende rol van de overheid uit scenario 2 had als gevolg dat, naast de technologische ontwikkelingen, ook op het sociale vlak ontwikkelingen plaatsvonden. Deze co-evolutie zorgt ervoor dat effecten van de ontwikkelingen elkaar wederzijds versterken. Hieruit volgt de conclusie dat een economisch-liberale overheid niet tot een optimaal duurzaam resultaat leidt en dat dit met een meer sturende overheid beter gerealiseerd wordt.

De conclusie dat een meer pro-actieve overheidsbeleid tot meer duurzame uitkomsten kan leiden is op zich niet nieuw. Tegelijkertijd is die conclusie wel omstreden. In het debat tussen voor- en tegenstanders van een pro-actief overheidsbeleid worden vaak heel algemene en simplistische beelden gepresenteerd van de te verwachten effecten van beide posities. De STSc methode kan dat debat verrijken door rijkere en meer samenhangende beelden te schetsen van mogelijke toekomstige ontwikkelingspaden. En dat hoeft dan niet te leiden tot een simpele keuze vóór of tegen een pro-actieve overheid, maar kan inzicht bieden in onder welke omstandigheden een pro-actief optreden nuttig zou kunnen zijn en wanneer men het beter aan de markt kan overlaten. In het bovenstaande zijn daarvan een aantal voorbeelden gegeven.

Om een beeld te schetsen van hoe zo'n sturende overheid eruit ziet zijn er in 9.2 tot en met 9.4 beleidsadviezen geformuleerd. De aanbevelingen die gemaakt zijn zeer algemeen, omdat de doelstelling van dit onderzoek vooral is om te laten zien dat de STSc methode een belofte inhoudt. De uitgangspunten in het ontwikkelen van beide scenario's waren

daarom arbitrair met als enig doel om voldoende contrast te kunnen creëren dat laat zien dat een verschil in opstelling van de overheid tot heel verschillende uitkomsten kan leiden. Om tot meer verfijndere aanbevelingen te kunnen komen kan de methode worden gebruikt om met andere ontwerpkeuzes verschillende transitiepaden te verkennen.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	11
2	Theorie	15
2.1	Transitietheorie	15
2.2	Transitiebeleid	18
2.3	Sociotechnische Scenario's	19
3	Personenvervoerregime	25
3.1	De auto	26
3.2	Openbaarvervoerdiensten	31
3.3	Probleemgebieden	32
3.4	Trends binnen het regime	35
3.5	Overheden	43
3.6	Oplossingstrategieën met toekomstverwachtingen	44
4	Waterstofniche	49
4.1	Productie	50
4.2	Opslag en distributie	52
4.3	Toepassingsmogelijkheden in het personenvervoer	54
4.4	Veiligheid	56
4.5	Publieke Acceptatie	58
4.6	Onderzoeks- en demonstratieprojecten	58
4.7	Clean Urban Transport for Europe	62
5	Overige Ontwikkelingen	67
5.1	Niches	67
5.2	Landschap	72
6	Ontwerpen van sociotechnische scenario's	73
6.1	Sociotechnische scenario's	73
6.2	Ontwerpmethode	74
6.3	Ontwerpkeuzes	76
6.4	Het schrijven van het scenario	78
7	Scenario 1: Een economisch liberale overheid	79
8	Scenario 2 - Een sturende overheid	93

9	Analyse en Reflectie	107
9.1	Analyse van de uitkomsten van de scenario's	108
9.2	Beleidsadviezen naar aanleiding van de analyse	110
9.3	Aanscherpen van de beleidsadviezen met behulp van de monstertheorie . .	113
9.4	Het huidige beleid van de overheid en de geformuleerde beleidsadviezen . .	116
9.5	De STSc-methodiek	118
9.6	Conclusie	119
A	Lijst van geïnterviewden	123
B	Interviewvragen	125
C	Probleemtabellen	127
D	Scenarioskeletten	135
	Bibliografie	156

Hoofdstuk 1

Inleiding

Decennialang is mobiliteit al voorwerp van zorg, zowel voor de overheid, het bedrijfsleven als individuen. Nederland slibt langzaam dicht. Files zorgen voor veel ergernis en economische nadelen. De mobiliteit van mensen in Nederland neemt toe, in 2020 naar verwachting met 30% ten opzichte van 2001 en daarmee komen de bereikbaarheid, veiligheid en de kwaliteit van de leefomgeving nog verder onder druk te staan [Hoof, 2001].

Door een toename van het aantal voertuigen op de weg treedt congestie op, een hogere emissie van milieuvervuilende stoffen en verslechterende bereikbaarheid en leefbaarheid. Maatregelen van de overheid, zoals stimulering van het gebruik van openbaar vervoer en terugdringing van auto's uit de steden, brengen weinig of geen verbetering. Het is noodzakelijk om tot een integrale, duurzame oplossing van de problemen in het verkeer en vervoer te komen.

Een duurzame oplossing is hierbij dat voorzien wordt in de behoeftes van huidige generaties zonder dat dit ten koste gaat van toekomstige generaties [World Commission on Environment and Development, 1987]. Deze definitie kan op meerdere manieren ingevuld worden, waardoor het moeilijk is om een oplossing als duurzaam te betitelen. Duurzaamheid is daarom een relatief begrip en kan daardoor alleen vergelijkenderwijs toegepast worden: technologie A is een meer / minder duurzame oplossing dan technologie B [Elzen, 2005; de la Bruheze, 2005].

Een duurzame oplossing vraagt om vergaande en ingrijpende veranderingen: een transitie. Een transitie wordt gedefinieerd als een lange termijn ontwikkelingsproces, waarin op zowel technologisch als maatschappelijk vlak (co-evolutie) een drastische verandering optreedt in het verkeer- en vervoerssysteem [Elzen et al., 2004]. Omdat technologische innovaties niet vanzelf tot duurzame uitkomsten leiden, is het voor de overheid en andere beleidsvormende instanties wenselijk om de lopende ontwikkelingsprocessen te kunnen bijsturen met behulp van transitiebeleid.

In een transitie speelt een groot aantal factoren een rol. Het is ondoenlijk om met al deze factoren te experimenteren. Door middel van toekomstverkenningmethodieken is het mogelijk inzicht te krijgen op de verschillende ontwikkelingsrichtingen binnen een transitieproces en welke innovaties daarvoor gestimuleerd dienen te worden. Omdat bestaande verkenningmethodieken beperkingen hebben voor het verkennen van transitieprocessen is recentelijk aan de Universiteit Twente een nieuw instrument ontwikkeld, namelijk Sociotechnische Scenario's (STSc). De ontwikkelaars van de methodiek hebben de brede inzetbaarheid getoond van STSc door de methodiek uit te werken op de domeinen van personenvervoer en elektriciteitsvoorziening. Daarnaast hebben de ontwikkelaars aangegeven dat de methode nog niet optimaal is [Elzen et al., 2002, 2004]. Vervolgens ontstond voor de ontwikkelaars de vraag, of het instrument ook door anderen, die niet betrok-

ken zijn geweest bij de ontwikkeling, gehanteerd kan worden. En een tweede vraag die ontstond is of STSc geschikt is om een specifieke case te analyseren. Deze twee vragen hebben geleid tot dit afstudeeronderzoek.

In het kader van dit afstudeeronderzoek is het onmogelijk om verscheidene transitieprocessen in verschillende domeinen te onderzoeken. Daarom is gekozen om het onderzoek te beperken tot een enkele case, namelijk de inzet van waterstoftechnologie in het personenvervoer. Waterstof wordt algemeen gezien als de brandstof van de toekomst die alle problemen in het personenvervoer kan oplossen. In het netwerk rondom waterstof bestaat onder actoren een verscheidenheid aan visies en verwachtingen over de manier waarop waterstoftechnologie ingezet kan worden. Deze verscheidenheid vertaalt zich in een grote diversiteit van activiteiten op het gebied van waterstoftechnologie [Berg, 2004; Avadikyan et al., 2003; Elzen, 2005]. In dit afstudeeronderzoek wordt na een analyse van de niche een tweetal transitiepaden voor waterstoftechnologie verkend. Op basis van deze verkenningen wordt getracht een aantal beleidsadviezen te formuleren om te komen tot een meer duurzaam personenvervoersysteem. Deze onderzoeksstappen worden vertaald naar de hoofdvraag van dit onderzoek:

Hoe kan de methode van Sociotechnische Scenario's ingezet worden om beleidsadviezen te formuleren voor een transitie naar een optimaal duurzame inzet van waterstoftechnologie in het personenvervoer?

Deze hoofdvraag wordt uitgewerkt op basis van de volgende deelvragen:

- Hoe kan de STSc methode gebruikt worden om contrasterende transitiepaden te verkennen voor het personenvervoer met een focus op een concrete case, te weten waterstof?
- Kunnen op basis van de met STSc gemaakte verkenningen aanbevelingen voor beleid worden gedaan? Zo ja, welke aanbevelingen kunnen gedaan worden?
- Elzen et al. [2002] gaven aan dat de STSc-methode nog niet optimaal is. Welke suggesties voor verandering en verbetering van de methodiek kunnen er gedaan worden?

Opbouw van de scriptie

Deze scriptie is onderverdeeld in acht hoofdstukken. In hoofdstuk 2 wordt verder ingegaan op het theoretische kader van waaruit dit onderzoek is opgezet. Begrippen als transitie en sociotechnische scenario's (inclusief een stappenplan voor het opzetten van Sociotechnische Scenario's) worden verder uitgelegd.

In hoofdstuk 3 is de dynamiek van het huidige personenvervoersysteem beschreven. Deze dynamiek bestaat uit: een onderscheid tussen de auto en het openbaar vervoer in het personenvervoersysteem, de problemen die bestaan binnen het huidige personenvervoersysteem, de trends die in het regime ontstaan zijn door interne ontwikkelingen en effecten van toegepaste oplossingsstrategieën en tot slot de huidige strategieën om de problemen in het personenvervoer aan te pakken.

In hoofdstuk 4 wordt de niche rondom waterstoftechnologie geanalyseerd. Hierbij is aandacht voor: de beloftes en verwachtingen van waterstof, de barrières die er zijn en de daarbijbehorende toekomstverwachtingen om deze te tackelen en tot slot welke onderzoek- en demonstratieactiviteiten gaande zijn met betrekking tot waterstoftechnologie.

Hoofdstuk 5 analyseert in het kort een aantal niches en landschapsfactoren die een rol gaan spelen in de scenario's. Bij deze analyse worden dezelfde vragen als voor waterstoftechnologie behandeld. Niches die aan bod komen zijn: rekeningrijden, de Congestion Charge, biodiesel, automatische voertuiggeleiding en alternatieve aandrijvingstechnologieën zoals elektrisch en hybride.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 6 kort beschreven welke methode gebruikt is om de twee scenario's uit hoofdstuk 7 en 8 te ontwerpen. Deze methode is gebaseerd op het zeven stappenplan uit de ontwerpmethodologie voor de constructie van STSc (zoals beschreven in hoofdstuk 2). Van de verschillende stappen worden de tussenresultaten getoond. In appendix C en D is een tweetal tussenstappen opgenomen om het hoofdstuk overzichtelijk te houden.

Omdat op basis van de scenario's beleidsadviezen geformuleerd worden, is ervoor gekozen om in de scenario's een tweetal type overheden te schetsen: een economisch-liberale en een sturende overheid. Het eerste scenario, met een economisch-liberale overheid, in hoofdstuk 7 is ontworpen aan de hand van de huidige verwachtingspatronen voor waterstoftechnologie. Het is echter de vraag of dit extrapolerende scenario duurzaamheid in brede zin dichterbij brengt. Daarom wordt aan de hand van verschillende duurzaamheidsaspecten (congestie, bereikbaarheid en leefbaarheid, milieu en kwaliteit van het vervoer) gereflecteerd op het extrapolerende scenario. De zwakke punten die hieruit volgen, worden gebruikt voor het schetsen van een tweede scenario in hoofdstuk 8. Dit tweede scenario, met een sturende overheid, schets een toekomstbeeld waarin de zwakke punten van het eerste scenario beter gedekt worden.

Tot slot van deze scriptie worden in hoofdstuk 9 de uitkomsten van de scenario's geanalyseerd voor verschillende duurzaamheidsaspecten. Op basis hiervan wordt een aantal beleidsadviezen geformuleerd die de effecten van wenselijke scenario uitkomsten moeten versterken. Vervolgens wordt de "Monstertheorie" van Martijntje Smits gebruikt om vanuit een filosofisch oogpunt te reflecteren op het ontwikkelingsproces van waterstoftechnologie. Deze reflectie wordt gebruikt om de eerder geformuleerde beleidsadviezen aan te scherpen. De zo ontstane beleidsadviezen worden afgezet tegen het huidige beleid, zodat aangegeven kan worden waar de Nederlandse overheid haar beleid moet aanpassen om tot een meer duurzaam personenvervoer te komen. Het tweede deel van dit hoofdstuk geeft verbeterpunten aan voor de STSc-methodiek gebaseerd op de ervaringen die tijdens deze afstudeerperiode met de methode opgedaan zijn. In het derde deel van het hoofdstuk worden vervolgens de hoofdvraag en subvragen van het onderzoek beantwoord.

Hoofdstuk 2

Theorie

In dit hoofdstuk wordt het theoretische kader aangegeven waaruit de scenario's over de transitie van het personenvervoer naar waterstoftechnologie ontworpen zijn. Een transitie is een lange termijnontwikkeling waarbij zowel op technologisch als maatschappelijk vlak drastische veranderingen plaatsvinden binnen het personenvervoer. Vanuit het oogpunt van duurzaamheid is het wenselijk om transities uit te lokken of te sturen, door de complexiteit van een transitie is dit echter vrijwel onmogelijk [Elzen et al., 2004]. Mogelijk wel haalbaar is om gedurende een lange periode de ontwikkelingen in een gewenste richting bij te sturen. Bij een transitieproces zijn meerdere innovaties en factoren betrokken waardoor op de lange termijn verschillende uitkomsten van het proces ontstaan.

In transitiebeleid kan ervoor gekozen worden om de ontwikkeling van een innovatie te stimuleren. Om te bepalen welke innovaties gestimuleerd dienen te worden, om het transitieproces in een gewenste richting te kunnen bijsturen, is het van belang te weten welke transitierichtingen er mogelijk zijn en welke rol innovaties en factoren in het proces spelen. Scenario's of toekomstverkenningen worden gebruikt om dit inzicht te verkrijgen. Aan de Universiteit Twente is de methodiek voor sociotechnische scenario's ontworpen specifiek voor het verkennen van transitieprocessen.

Dit hoofdstuk is opgebouwd uit drie onderdelen. Allereerst wordt in paragraaf 2.1 de theorie over transities verder uitgewerkt. Op basis van deze theorie wordt in paragraaf 2.2 aangegeven hoe transitiebeleid vormgegeven kan worden. Tot slot van dit hoofdstuk wordt in paragraaf 2.3 de methode van sociotechnische scenario's besproken. Hierbij komen de volgende onderwerpen aan bod: de rol van toekomstscenario's in transitiebeleid, het verschil tussen sociotechnische scenario's en andere scenariomethodieken en een stappenplan voor het ontwerpen van sociotechnische scenario's. Bij het stappenplan wordt verwezen naar de verschillende hoofdstukken waarin de stappen verder uitgewerkt zijn.

2.1 Transitietheorie

In een systeem, zoals het personenvervoer vinden normaal gesproken incrementele (systeemverbeterende) ontwikkelingen plaats. Hierbij is karakteristiek dat op technologisch gebied ontwikkelingen plaatsvinden terwijl op maatschappelijk gebied relatief weinig verandert. Een voorbeeld hiervan is de wegmarkering. In de afgelopen jaren is op bepaalde filegevoelige snelwegen in Nederland geëxperimenteerd door de wegbewijzing te vervangen door speciale LEDs, waarmee van een tweebaansweg eenvoudig een driebaansweg gemaakt wordt. Dit heeft niet geleid tot significante wijzigingen in de congestie.

Een transitie onderscheidt zich van de normale systeemverbeterende ontwikkelingen

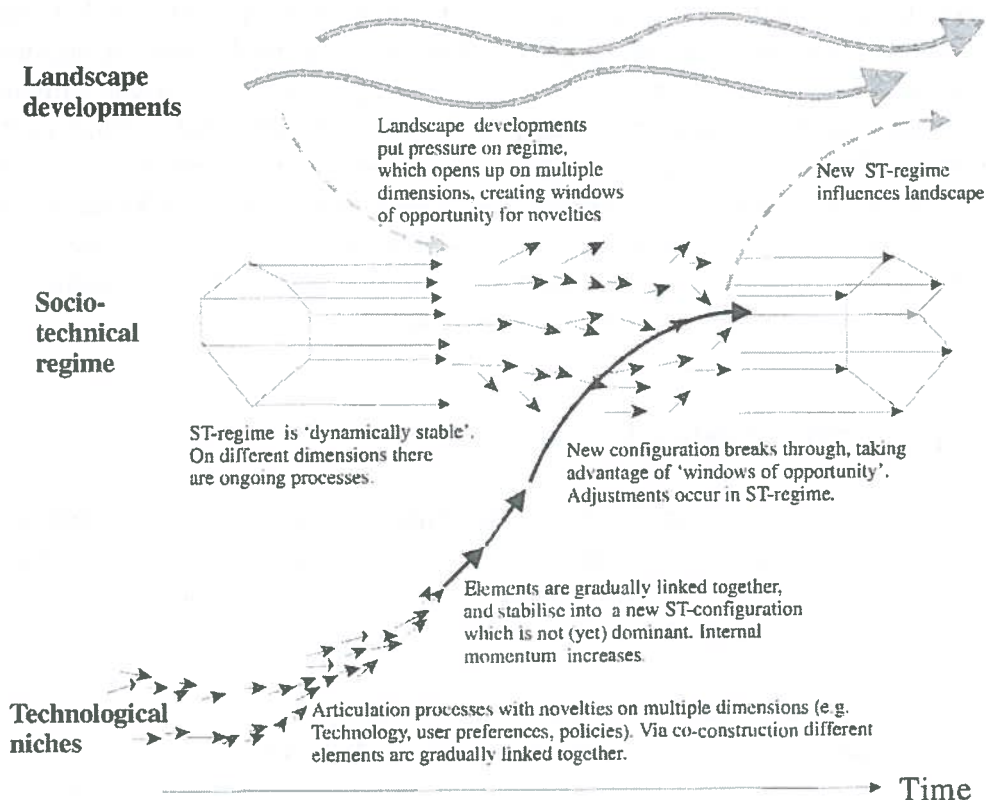
doordat zowel op technologisch als op maatschappelijk vlak (co-evolutie) drastische veranderingen plaatsvinden. Een transitie heeft verschillende oorzaken hebben zoals aanhoudende problematiek in het systeem waarbij systeemverbeterende ontwikkelingen geen langdurige oplossing bieden. Om transities en systeeminnovaties beter te begrijpen wordt gebruik gemaakt van het multi-level perspectief (MLP). In dit perspectief wordt onderscheid gemaakt tussen drie niveaus, namelijk [Elzen et al., 2004, 2002; Geels, 2002b]:

1. **Het sociotechnologische regime**, mesoniveau, verwijst naar het systeem, een set van regels rondom technologieën, die tezamen een sociale functie vervullen, zoals personenvervoer, energievoorziening, communicatie, etc. Deze set van regels wordt gedragen door meerdere maatschappelijke groepen en wordt gebruikt voor het definiëren en oplossen van problemen in het systeem. De ontwikkelingen binnen het systeem zijn incrementeel van aard: er wordt alleen geïnvesteerd in systeemverbeterende innovaties. Dit leidt tot een dynamische vorm van stabiliteit: er is een algemene set van regels, maar er is nog steeds ruimte voor ontwikkeling.
2. **Het sociotechnische landschap**, macroniveau, is de omgeving rondom het regime en de niche(s). Het landschap bestaat uit een heterogene set van factoren die invloed uitoefenen op ontwikkelingen in het regime, maar niet direct beïnvloedbaar zijn door actoren uit het regime zelf. Voorbeelden van landschapsfactoren zijn: de olieprijs, economische groei, oorlogen, etc.
3. **Een technologische niche**, microniveau, is een beschermde omgeving rondom een radicale innovatie. Deze bescherming is noodzakelijk omdat een innovatie in de beginstadia van ontwikkelingen niet in staat is om op de markt te concurreren met bestaande technologieën in het regime. De radicale innovaties hebben echter wel de belofte in zich om op termijn bepaalde problemen in het regime op te lossen. Een niche wordt gevormd door een groep van actoren die de gemeenschappelijke verwachting hebben dat een innovatie op termijn levensvatbaar is. Zij zijn er ook toe bereid om inspanningen te verrichten om dat te bewerkstelligen. Hierbij wordt gericht en bij toeval geleerd. Voorbeeld hiervan zijn de brandstofcelbussen die in Amsterdam rijden.

Vanuit dit multi-level perspectief is verklaarbaar dat een radicale innovatie moeite heeft om door te breken in het weerbarstige regime. Radicale innovaties wijken af van het incrementele ontwikkelingstraject binnen het regime en stuiten daardoor op veel verzet vanuit het regime zolang dit stabiel is. Aan de andere kant vormen radicale innovaties de basis voor een transitie. Een transitie ontstaat doordat processen op de drie niveaus van het multi-level perspectief koppelen en elkaar versterken. De doorbraak van een innovatie vindt doorgaans niet in één keer plaats, maar in een opeenvolging van kleine stapjes en doordat meerdere innovaties en factoren elkaar versterken.

In figuur 2.1 is het transitieproces in de tijd weergegeven vanuit het multi-level perspectief. Dit proces wordt verdeeld in vier fases [Elzen et al., 2004; Geels, 2002b]:

1. **Voorontwikkeling**: op nicheniveau worden nieuwe radicale innovaties ontwikkeld. Deze niches worden geïnterpreteerd in termen van het bestaande regime en zijn gericht op het oplossen van lokale problemen. Zowel qua technische vorm als functie blijft de innovatie dicht bij het bestaande regime staan.
2. **Lancering**: innovaties dringen door in specifieke marktniches waarbij nieuwe functionaliteiten onderzocht worden. Rondom de innovatie ontstaat een ondersteunend



Figuur 2.1: Het transitieproces gezien vanuit het multi-level perspectief [Geels, 2002b]

netwerk dat zich specialiseert en geleidelijk nieuwe ontwerpregels ontwikkelt. Naarmate de gebruikers meer ervaring krijgen met de nieuwe techniek, worden de gebruikerswensen duidelijker en nieuwe functionaliteiten ontstaan.

3. **Versnelling:** innovaties dringen breed door in massamarkten en gaan de competitie aan met het bestaande regime, doordat het regime destabiliseert. De destabilisering ontstaat door verschillende factoren, zoals economische perspectieven (verbeterde prijs / prestatieverhoudingen), aanhoudende problematiek, etc.
4. **Verdringing en stabilisering:** rondom het doorbreken van de innovaties ontstaan bredere maatschappelijke effecten welke tot de vervanging van het bestaande regime leiden. De rollen raken omgekeerd. De aanvankelijke sturende invloeden vanuit de maatschappij op de innovaties verandert geleidelijk in een sturende invloed van de innovaties op de maatschappij. Het regime stabiliseert zich weer met opname van de doorgebroken innovaties.

In transitieprocessen heeft Geels (2002b) een onderscheid gemaakt tussen twee transitiepatronen: technologische substitutie en een brede transformatie route. In het proces van technologische substitutie is een relatief stabiel regime totdat een innovatie doorbreekt in de massamarkt. De doorbraak van de innovatie dwingt vervolgens veranderingen af op zowel technologisch als maatschappelijk vlak waardoor een nieuw regime gevormd wordt met daarin opgenomen de nieuwe innovatie. Ontwikkelingen op nicheniveau zijn slecht zichtbaar voor actoren op regimeniveau waardoor, in combinatie met de stabiele situatie in het regime, de doorbraak onverwacht is [Geels, 2002a, b].

Bij een transitie met het patroon van een brede transformatie is het regime al in een eerdere fase instabiel aan het worden. Aanhoudende problemen of veranderingen in landschapsfactoren creëren ruimte voor ontwikkelingen op verschillende dimensies, zoals: cultuur, technologieën, gebruikerseisen, politiek, etc. Er ontstaat ruimte voor meerdere innovaties om door te breken in het regime en actoren worden gestimuleerd om te experimenteren met veel technologische opties. Na deze periode van ontwikkelingen volgt doorgaans een afkoelingsperiode waarin het aantal technologische opties gereduceerd wordt. Gaandeweg krijgt een enkele technologische optie de dominantie waaromheen een nieuw sociotechnisch regime gevormd wordt [Geels, 2002a].

2.2 Transitiebeleid

Als gekeken wordt naar de geschiedenis, dan zijn er altijd al transities geweest (bijvoorbeeld de overgang van paard en wagen naar de auto). Deze transities hebben als kenmerk dat ze hebben plaats gevonden zonder dat er invloed op uit geoefend is om een bepaalde uitkomst te bereiken. Ook in de toekomst kunnen niet gestuurde innovaties blijven plaatsvinden die leiden tot transities. Zo is het bijvoorbeeld waarschijnlijk dat er tal van innovaties plaatsvinden die milieuvervuiling en broeikaseffecten verminderen. Deze innovaties en oplossingen zijn dikwijls incrementeel waardoor hun effecten en (sociotechnische) uitkomsten ongewis zijn. Met andere woorden, deze incrementele innovaties vinden niet plaats vanuit een breder (sociotechnisch) kader van duurzame ontwikkeling. De Nederlandse overheid heeft in het Vierde Nationale Milieubeleidsplan geschat dat met incrementele innovaties de milieuproblemen met een factor twee verminderd kunnen worden. Een grootschalige transitie naar duurzame technologie daarentegen kan de milieuproblemen met een factor tien verminderen. Voor een langdurige aanpak van de milieuproblemen is het voor beleidsmakers bij de Nederlandse overheid wenselijk om een grootschalige transitie naar het gebruik van duurzame technologie te bevorderen. Hierbij ontstaat de vraag met welke maatregelen een grootschalige transitie in het personenvervoer in de gewenste richting bevorderd kan worden? [Elzen et al., 2004; Geels, 2002b]

Voor transitiebeleid vanuit de overheid moet rekening gehouden worden met een aantal factoren [Geels, 2002a; Elzen et al., 2004]:

- De overheid is maar één van de sociale groepen betrokken in een transitieproces. Door middel van wetgeving kan ze invloed uitoefenen, maar ze is niet almachtig. Andere actoren die betrokken zijn bij transitieprocessen zijn: bedrijven en hun toeleveranciers, maatschappelijke groepen, onderzoeksinstituten etc. Elk van deze groepen heeft zijn eigen belangen en strategieën.
- De overheid is niet een enkele homogene actor, maar bestaat uit verschillende onderdelen met eigen belangen. Er is onder andere een onderverdeling naar werkterreinen (economische zaken, milieu, verkeer & waterstaat) en naar niveaus (landelijke versus lokale overheden). Door deze onderverdelingen is het mogelijk dat tegenstrijdige belangen ontstaan. Een voorbeeld hiervan is rekeningrijden dat een gunstig effect kan hebben op het verminderen van files. Aan de andere kant kan het nadelige gevolgen hebben voor de economie doordat het transport over de weg duurder maakt. Deze tegenstrijdige belangen maken het lastig om vanuit de overheid een eenduidig transitiebeleid te ontwikkelen, dat op verschillende terreinen en niveaus veranderingen bewerkstelligt.

- Transitiees zijn door hun complexiteit moeilijk te overzien en weinig controleerbaar. De verschillende actoren in een transitieproces hebben elk hun eigen strategieën, middelen, netwerken om een voor hun zo gunstig mogelijke situatie te creëren. De actoren reageren op nieuwe ontwikkelingen, zoals in een enorm spel, om de uitkomst van het transitieproces zo gunstig mogelijk te houden. Omdat alle groepen eigen belangen hebben en daar zelden open en eerlijk voor uitkomen, is er niemand die het gehele spel kan overzien.
- Transitiees zijn geen lineaire, maar open onvoorspelbare processen. In het spel tussen actoren in het transitieproces worden verschillende besluiten genomen. Uitkomsten van deze besluiten krijgen deels onbedoelde effecten waardoor het spel een nog minder voorspelbare richting inslaat.

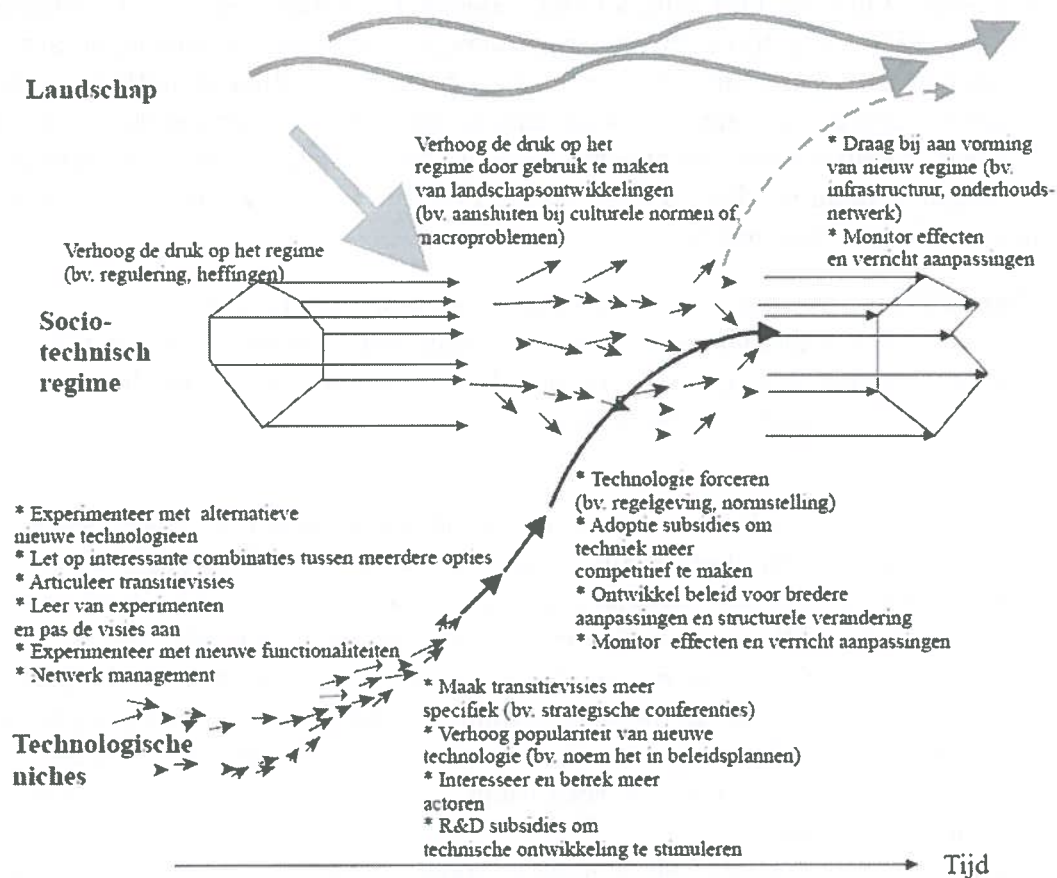
Door bovenstaande factoren is het moeilijk om zekerheden over transitiebeleid te geven, maar niet onmogelijk. Belangrijk is dat het transitiebeleid dynamisch wordt, zodat het in kan spelen op lopende processen en indien nodig deze kan bijsturen. Een algemene strategie in transitiebeleid is de druk op het regime te verhogen om zo de kans op doorbraak van de in niches aanwezige alternatieven te stimuleren. Gelijktijdig moeten de alternatieven aanwezig in de niches gestimuleerd worden, zodat deze zo gemakkelijk mogelijk kunnen doorbreken in het regime. In figuur 2.2 is aangegeven hoe het transitiebeleid gedurende de vier fasen in een transitieproces ingevuld zou kunnen worden [Geels, 2002a; Elzen et al., 2004].

In theorie ziet het transitiebeleid zoals weergegeven in figuur 2.2 er aantrekkelijk en eenvoudig uit, maar het laat nog steeds een aantal vragen open. Er is vaak een veelheid aan alternatieven in ontwikkeling die allemaal een zekere belofte in zich hebben, maar welke daarvan kunnen gerealiseerd worden? Welke ontwikkelingen zijn er mogelijk en welke effecten hebben deze op zowel technologisch als sociologisch vlak? [Elzen et al., 2004; Geels, 2002a]

Scenario's en toekomstverkenningen kunnen een belangrijk hulpmiddel vormen om dergelijke vragen te beantwoorden. Ze geven inzicht op welke manier een niche kan doorbreken in het regime. Hierbij is belangrijk welke koppeling van factoren deze doorbraak kan bewerkstelligen. Vervolgens kan afgevraagd worden of een dergelijke doorbraak wenselijk is en of deze gestimuleerd dient te worden [Elzen et al., 2004; Geels, 2002a].

2.3 Sociotechnische Scenario's

Volgens Elzen et al. (2004) hebben bestaande strategische scenario- en verkenningsmethodieken een aantal beperkingen waardoor ze minder geschikt zijn voor transitiescenario's. Allereerst hebben de methodieken het ideaal om de toekomst te exploreren aan de hand van kwantitatieve exploratiemethoden (zoals trends en computermodellen). De toekomst wordt hierdoor gebaseerd op incrementele innovaties en extrapolatie van de huidige trends en ontwikkelingen. Hierbij is naar zijn mening te weinig aandacht voor discontinuïteiten en radicale veranderingen die gedurende een transitieproces plaatsvinden. Ten tweede wordt teveel gefocust op specifieke aspecten binnen een transitieproces zonder naar het bredere systeem eromheen te kijken. De diffusie van een technologie wordt alleen bekeken vanuit een prijs / performance inschatting, maar de bredere veranderingen, met name de rol van actoren (leerprocessen, allianties, strategieën,...), worden te weinig aandacht gegeven.



Figuur 2.2: Verschillende maatregelen die genomen kunnen worden in een transitieproces [Elzen et al., 2004; Geels, 2002b]

De bestaande strategische methoden zijn door deze beperkingen geschikt voor verkenningen van relatief stabiele situaties, waarin de actoren hetzelfde willen en het systeem ongewijzigd blijft. In een transitie verandert het systeem structureel en zijn er periodes van onzekerheden over de uitkomsten waardoor strategische methoden minder geschikt zijn. Volgens Elzen et al. (2004) moeten transitiescenario's aan de volgende eisen voldoen:

- Het scenario dient sociotechnische ontwikkelingen te tonen (de co-evolutie van techniek en maatschappij).
- In het scenario dient de koppeling tussen niches en het regime zichtbaar te zijn.
- Leerprocessen en de nichedynamiek in de scenario's moeten zichtbaar zijn.
- Er moet aandacht zijn voor de interactie tussen verschillende niches en niet alleen aandacht voor de diffusie van individuele innovaties. Hierbij dienen mogelijke koppelingen en wederzijdse versterkingen tussen niches zichtbaar te worden.
- Er moet aangegeven worden via welke stapeling van niches (nichecumulatie) een doorbraak in het bestaande regime kan verlopen.

Bestaande scenario- en verkenningsmethodieken voldoen niet aan deze vereisten en daarom is aan de Universiteit Twente een nieuwe methodiek ontwikkeld, namelijk Sociotechnische Scenario's (STSc). Deze methodiek is gebaseerd op de eerder beschreven transitietheorie (zie 2.1) en voldoet aan de aangegeven eisen voor een transitiescenario.

Standaard begint het scenario met een korte voorgeschiedenis zodat het ontwikkelingspad in het scenario aansluit op de lopende ontwikkelingspaden. De toekomstverkenning volgt vervolgens de vier fases in het transitieproces volgens de eisen die gesteld worden aan transitiescenario's. Een STSc kan volgens het door Elzen et al. (2002) zevenstappenplan ontworpen worden. Deze stappen worden nu kort besproken [Elzen et al., 2002, 2004].

Stap 1 - Ontwerpkeuzes en de contouren van het scenario

In de eerste plaats moet voor een ontwerper duidelijk zijn met welk doel de scenario's ontworpen worden. Gaat het er om trajecten naar een duurzaam vervoerssysteem te verkennen? Of worden transitietrajecten voor alternatieven voor fossiele brandstoffen verkend? De focus kan ook gelegd worden op het transitietraject van een enkele technologie die in ontwikkeling is.

Verder worden keuzes gemaakt betreffend: het aantal scenario's, de tijdsperiode die in de scenario's beschreven wordt en de belangrijke contrastpunten tussen de verschillende scenario's in het transitietraject. Om contrasten zichtbaar te maken in het transitietraject is het voor de methodiek van STSc noodzakelijk om minimaal twee scenario's te ontwerpen [Elzen et al., 2002].

In dit afstudeeronderzoek is ervoor gekozen om een tweetal transitiepaden van waterstoftechnologie tot 2050 te analyseren met variatie in de rol van het overheidsbeleid in beide scenarios zodat uiteindelijk beleidsadviezen aan de overheid geformuleerd kunnen worden. In het eerste scenario neemt de overheid een meer economisch liberale houding aan en daardoor de ontwikkelingen aan de markt overlaten. Het tweede scenario laat een meer sturende overheid zien waarin de overheid duidelijk de ontwikkelingen in een gewenste richting stuurt. In hoofdstuk 6 wordt deze stap verder uitgewerkt.

Stap 2 - Inventarisatie van interessante transitie-elementen

In de tweede stap worden voor elk niveau (regime, niche en landschap) de koppelmogelijkheden gedefinieerd. Deze vormen de transitie-elementen van het scenario. De transitie-elementen kunnen gekoppeld de basis vormen voor een transitie. Een transitie-element is niet persé een technologie, maar kan ook een element zijn uit politiek, cultuur, markt, productie, infrastructuur, milieu, financiële wereld, etc.

In een transitie kunnen verschillende koppelingen plaatsvinden. Er kan hybridisatie optreden waarbij twee technologische opties met elkaar een nieuwe optie creëren. Een voorbeeld hiervan is het hybridevoertuig dat een combinatie is van de standaard verbrandingsmotorauto en de elektrische auto. De introductie van een nieuwe technologie leidt tot gedragsveranderingen bij gebruikersgroepen. Deze groepen kunnen onder bepaalde omstandigheden groeien. Het is ook mogelijk dat er een koppeling plaatsvindt tussen technologische en politieke ontwikkelingen. Voorbeeld hiervan is het demonstratieproject in Europese steden waarbij de ontwikkeling van de brandstofcelbus gekoppeld werd aan de wens van Europese steden om een schoon openbaar vervoerssysteem te ontwikkelen. Naast de drie genoemde voorbeelden is er nog een grote diversiteit aan koppelingen mogelijk.

Bij het identificeren van de transitie-elementen moet niet gestreefd worden naar volledigheid, maar wordt gezocht naar een dusdanige set van transitie-elementen die voldoende rijkheid bieden voor de scenario's. In principe is er een oneindig aantal mogelijke koppelingen denkbaar. De geïdentificeerde transitie-elementen worden tijdens het maken van de scenario's gebruikt om het transitieproces vorm te geven. In de gecreëerde scenario's zijn

niet alle mogelijkheden verder uitgewerkt, omdat het ondoenlijk is om alle koppelingen in een scenario te bespreken [Elzen et al., 2002].

Een koppeling die optreedt in scenario 2, en niet in scenario 1, is de invloed van een tolheffing om de centra van een stad in te komen met de auto, de congestion charge, op het reizigersgedrag. Zo'n tolheffing past beter bij een sturende overheid dan bij een economisch-liberale overheid. Deze stap wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 6.

Stap 3 - De dynamiek van het regime

In deze stap wordt begonnen met het analyseren van het eerste niveau van het multi-level perspectief, namelijk het regime. Een aantal factoren in het regime dient geïdentificeerd te worden: de belangrijkste drijvers van de dynamiek in het regime, de problemen in het regime, de gehanteerde oplossingsstrategieën voor de problemen en de trends in het regime. Deze factoren moeten een beeld schetsen van de ontwikkelingsrichting van het regime op zowel technische als sociale dimensies. Daarnaast moet duidelijk worden waar nieuwe ontwikkelingen gaan aanhaken bij het regime [Elzen et al., 2002].

In hoofdstuk 3 wordt deze stap verder uitgewerkt. Eén van de trends die aan bod komt is dat het accessoireaanbod voor auto's steeds uitgebreider wordt. ABS, cruise control, airco, navigatiesystemen en airbags zijn tegenwoordig standaard uitrusting voor nieuwe auto's.

Stap 4 - Inventarisatie van landschapsfactoren

De dynamiek van het regime, niches en de onderlinge relatie worden beïnvloed door factoren vanuit het sociotechnische landschap. Deze factoren dienen geïdentificeerd te worden, omdat ze extra ruimte voor een innovatie creëren om aan te haken bij het regime. Voor STSc is het voldoende om de factoren kwalitatief te inventariseren [Elzen et al., 2002].

Een landschapsfactor die de laatste tijd steeds vaker in het nieuws komt is de steeds verder stijgende prijs voor fossiele brandstoffen. Deze landschapsfactor schept ruimte voor alternatieve brandstoffen, zoals biologische en waterstof, om zich te ontwikkelen tot serieuze alternatieven voor de bestaande brandstoffen. De inventarisatie van landschapsfactoren is in dit onderzoek gedaan gelijktijdig met de dynamiek van het regime in hoofdstuk 3.

Stap 5 - Analyse van relevante niches

Uit stap 1 en 2 van deze ontwerpmethodologie volgt een lijst van relevantie niches om te gebruiken in het scenario. In stap vijf worden deze niches verder geanalyseerd zodat duidelijk wordt welke mogelijke technische vormen er zijn, de potentiële markten voor de technologie, de beloftes van de niche, de actoren betrokken bij het ontwikkelingsproces, de verwachtingen van de actoren, de (nog) aanwezige barrières en de toekomstmogelijkheden van de niche [Elzen et al., 2002].

Als belangrijkste niche wordt waterstoftechnologie uitgewerkt in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden in het kort nog een aantal andere niches besproken, zoals: hybridevoertuigen, biobrandstoffen en de congestion charge.

Stap 6 - Ontwerpen van de scenarioskeletten

Voordat het scenario daadwerkelijk uitgeschreven wordt voor elk scenario het skelet ontworpen. Het skelet is een korte weergave van het scenario, waarin de chronologie van

ontwikkelingen getoond wordt. In het skelet wordt het transitieproces van het scenario beschreven: welke koppelingen tussen transitie-elementen vinden er plaats, de doorbraak van niches als gevolg van de ontstane koppelingen en het tijdspad waarin deze ontwikkelingen plaatsvinden [Elzen et al., 2002]. Een nader invulling van deze stap vindt in hoofdstuk 6 plaats.

Stap 7 - Ontwerpen van de scenario's

In de zevende stap wordt het ontworpen skelet verder opgevuld met details om de ontwikkelingen beter te illustreren en meer inzichtelijk te maken. Het resultaat van dit opvullen is een scenario waarin de ontwikkelingen op alle drie de niveaus in het multi-level perspectief getoond wordt [Elzen et al., 2002]. In de hoofdstukken 7 en 8 is het resultaat van deze stap weergegeven.

Stap 8 - Analyse van de uitkomsten van de scenario's

Na deze zevende stap worden de uitkomsten van de scenario's met elkaar vergeleken en geanalyseerd hoe deze uitkomsten mogelijk zijn geworden. De inzichten verkregen door deze analyse worden vervolgens gebruikt om aanbevelingen te doen voor transitiebeleid [Elzen et al., 2002]. In hoofdstuk 9 is deze stap uitgewerkt.

In de volgende drie hoofdstukken wordt begonnen met analyseren van het regime, relevante niches en landschapsfactoren. In het daarop volgende hoofdstuk 6 wordt vervolgens weer teruggekoppeld naar het stappenplan en de gehanteerde invulling daarvan. Hoofdstukken 7 en 8 vormen de resultaten van het ontwerpproces welke in 9 geanalyseerd worden.

Hoofdstuk 3

Personenvervoerregime

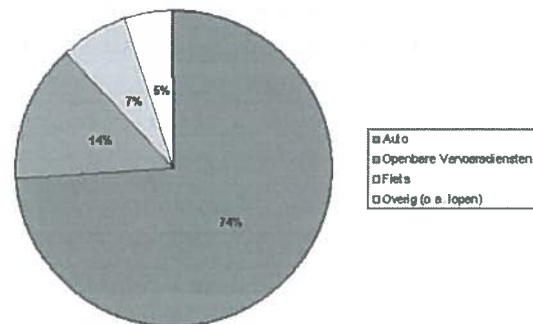
Het Nederlandse personenvervoerregime is te verdelen in vier categorieën van vervoer, namelijk auto, openbaar vervoer, fiets of overige vervoermiddelen (zie figuur 3.1). In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de twee meest gebruikte categorieën van vervoer, namelijk de auto en de openbare vervoermiddelen.

De auto heeft een aantal aantrekkelijke eigenschappen waardoor deze het meest gebruikte vervoermiddel is. Met de auto kun je bijvoorbeeld direct van deur tot deur reizen op elk gewenst ogenblik. In de auto zit je droog en kun je op eenvoudige wijze extra spullen meenemen. Deze eigenschappen hebben er toe geleid dat de auto ook een symbolische waarde heeft gekregen.

De auto vormt een onderdeel van je persoonlijkheid en geeft je een gevoel van vrijheid en macht. Maar de auto brengt ook een aantal problemen met zich mee. Zo legt de auto beslag op de ruimte doordat het een infrastructuur vereist van minimaal wegen, parkeerplaatsen en tankstations. Er zijn files op snelwegen en steden raken verstopt wat weer nadelige invloed hebben op de leefbaarheid (bijvoorbeeld geluidshinder). Een ander probleem van auto's is de emissie van gezondheidsbedreigende, luchtverontreinigende en klimaatbeïnvloedende gassen. In paragraaf 3.1 wordt verder ingegaan op de genoemde aspecten van de auto.

Naast het vervoer per auto heeft de reiziger de keuze om gebruik te maken van openbaarvervoerdiensten. Met de openbaarvervoerdiensten is het niet eenvoudig om van deur tot deur te reizen en er is geen landelijke dekking. Zo is de aansluiting van verschillende openbaarvervoerdiensten op elkaar niet ideaal, er is een gebrek aan privacy en er is een imago probleem met betrekking tot de gepercipieerde onveiligheid van dit vervoer. Het openbaar vervoer wordt ook gezien als een dure manier van reizen, doordat de kosten vergeleken worden met de marginale kosten van het autorijden (o.a. brandstofkosten, parkeergeld). Het openbaar vervoer kampt verder ook met dezelfde problemen als de auto, maar in mindere mate door het grotere aantal personen per vervoermiddel. In paragraaf 3.2 wordt verder ingegaan op de aspecten van de openbaarvervoerdiensten.

In het personenvervoerregime is een onderscheid gemaakt tussen drie grote probleemgebieden, namelijk congestie, bereikbaarheid en leefbaarheid en het milieu. Elk van deze gebieden correspondeert met een bepaald niveau van overheden: Europees, landelijk en stedelijk. Congestie bestaat uit de veelheid van files op het wegennet, die als een econo-



Figuur 3.1: Verdeling vervoerswijze op basis van kilometers [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1999]

misch probleem worden beschouwd. Congestie is de verantwoordelijkheid van de landelijke overheid. Bereikbaarheid en leefbaarheid zijn een stedelijk probleem waarbij het onder andere gaat om de perceptie van prettig en veilig wonen in een stad. Het milieuprobleem waarmee het personenvervoer kampt, bestaat uit twee types emissies. Allereerst zijn er de luchtverontreinigende en gezondheidsbedreigende stoffen, zoals koolmonoxide, stikstof-oxides en kleine deeltjes. Deze stoffen vormen een directe bedreiging voor de gezondheid doordat ze bijvoorbeeld ademhalingsbelemmerend zijn of smogbevorderend werken. Bij de luchtverontreiniging leveren de verschillende stoffen een bijdrage aan smogvorming en zure regen. Ten tweede zijn er de klimaatveranderende emissies, waaraan het personenvervoer een bijdrage levert door de emissie van vooral kooldioxide. Door een toename van het aantal broeikasgassen in de atmosfeer wordt meer warmte rondom de aarde vastgehouden, waardoor de gemiddelde temperatuur op aarde langzaam toeneemt. Dit resulteert in een klimaatverandering die de gehele biologische evenwichtssystemen permanent verandert. Vanaf Europees niveau wordt regelgeving vastgelegd met betrekking tot de uitstoot van milieuverontreinigende stoffen in het personenvervoer. In paragraaf 3.3 wordt verder ingegaan op de drie genoemde problemen. In het personenvervoer zijn nog wel meer problemen te onderscheiden, zoals verkeersveiligheid, maar deze zijn relatief van weinig invloed bij de keuze van de reiziger voor een bepaald vervoermiddel.

In het personenvervoerregime is een dynamiek aanwezig waarbij een onderscheid gemaakt wordt tussen marktkrachten en beleidskrachten. De marktkrachten vormen een interne dynamiek van het regime, zoals een toename van het aantal zwaardere voertuigen met een dieselmotor in het wagenpark. De beleidskrachten vormen vanuit de overheden een poging om de problemen in het regime te reguleren en zijn daardoor ook verbonden aan de interne dynamiek van het regime. Deze combinatie van krachten over de afgelopen jaren heeft geleid tot een aantal dominante trends die in paragraaf 3.4 besproken worden, namelijk: de ontwikkelingen op autobebouwing met de brandstofvoorziening, de voertuigemissies en de modal shift van de reiziger. Aan het eind van de paragraaf wordt gekeken wat de gevolgen zijn wanneer de trends gecombineerd.

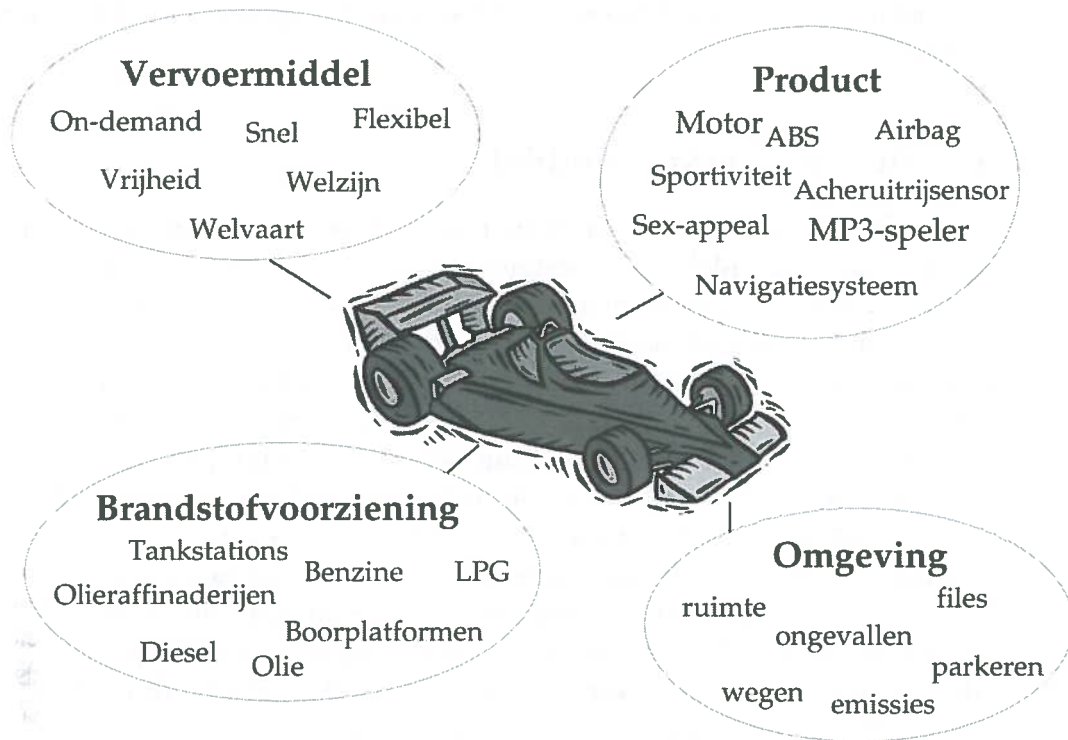
Voordat gekeken wordt naar de verschillende oplossingsstrategieën wordt kort aandacht besteed aan de rol die de overheid speelt in het personenvervoer. In paragraaf 3.5 wordt hierbij een onderscheid gemaakt tussen de Europese overheid, de landelijke overheid en lokale overheden. Globaal heeft elk type overheid de verantwoordelijkheid over één van de probleemgebieden.

Tot slot van dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de oplossingsstrategieën in paragraaf 3.6. Congestie wordt voornamelijk actief vanuit de overheid in samenwerking met de markt bestreden door een betere informatievoorziening naar de reiziger en dynamisch gebruik van de infrastructuur. De milieuvervuiling en het broeikaseffect wordt voornamelijk vanuit Europees niveau gereguleerd door middel van emissienormen. Het personenvervoer moet dan zorgen dat het aan deze normen voldoet. Op lange termijn moet er ook rekening gehouden worden met automatische voertuiggeleiding.

3.1 De auto

In vrijwel elk huishouden is wel een auto aanwezig. Vaak is de auto in privé-bezit, zodat deze op elk gewenst tijdstip beschikbaar is. De auto is qua vervoerstraject alleen gebonden aan de infrastructuur, waardoor het mogelijk is om van deur tot deur te reizen. Deze eigenschappen in combinatie met de geschiktheid van de auto voor meerdere doeleinden die

gecombineerd worden¹ geven de auto een flexibel karakter [Hoogma et al., 2002; Achterhuis and Elzen, 1998]. De dynamiek rondom de auto wordt verdeeld in vier stukken: de auto als product, de auto als vervoermiddel en de brandstofvoorziening voor de auto (zie figuur 3.2) en de omgeving.



Figuur 3.2: De dynamiek rondom de auto verdeeld in vier stukken

3.1.1 De auto als product

Het product auto is handelswaar waarbij er een spel is tussen producenten en consumenten. De producent probeert met behulp van intensieve promotiecampagnes de consument te verleiden tot aankoop van zijn product. In de promotiecampagnes wordt ingespeeld op de sex-appeal van de auto, het sportieve karakter en de accessoires die bijgeleverd worden. Zo wordt de Mazda 3 aangeprezen als een auto met atletische vormgeving, een functioneel interieur en sportieve eigenschappen [Mazda, 2004]. De Ford Mondeo wordt aangeprezen met de meegeleverde uitrusting bestaande uit: “een airconditioning, 6 airbags, ABS met EBD, een uitstekende autoradio, centrale portiervergrendeling met afstandsbediening, elektrisch bedienbare ramen vóór, cruise control (alleen TDCi) en het geavanceerde Intelligent Protection System” [Ford, 2004].

Voor de consument is het bezit en rijden in een auto, naast een vervoermiddel, een mogelijkheid om je persoonlijk en maatschappelijk te uiten. De auto geeft hierdoor een beeld van de status en de persoonlijkheid die de bestuurder van de wagen heeft. Voor de consument is het belangrijk dat de auto een zekere sex-appeal, sportieve of dominerende uitstraling heeft. De auto moet sneller zijn dan die van anderen op de weg. Er moeten allerlei accessoires in de auto aanwezig zijn om het rijden comfortabeler te maken, zoals een airco, stuurbekrachtiging en een navigatiesysteem. De consument is ook bereid hiervoor

¹Je kunt bijvoorbeeld voordat je naar je werk gaat met de auto, de kinderen afzetten bij school. Op de terugweg van je werk naar huis kun je boodschappen doen bij de supermarkt.

te betalen. Geld, brandstofverbruik en milieuvervuiling spelen een ondergeschikte rol bij de keuze voor een auto. Als de brandstofprijs stijgt hoor je de automobilist klagen, maar uiteindelijk gaan ze er niet minder door rijden. De consument wil een auto die bij zijn / haar persoonlijkheid past en ook de mogelijkheid biedt om de persoonlijke identiteit en de sociale status naar andere weggebruikers uit te stralen [Hoogma et al., 2002; Achterhuis and Elzen, 1998].

3.1.2 De auto als vervoermiddel

De auto is op elk gewenst moment bruikbaar als vervoermiddel om, zonder al te veel belemmeringen, naar een willekeurige bestemming te rijden met een hoge snelheid. De auto is hierdoor een symbool geworden voor een moderne levensstijl waarin de waarden flexibiliteit en vrijheid centraal staan [Achterhuis and Elzen, 1998]. De mobiliteit van mensen wordt gekoppeld aan de welvaart en welzijn in het land, waardoor het voor de Nederlandse overheid wenselijk is om de mobiliteit zo hoog mogelijk te maken en houden. Daarom faciliteert de overheid de infrastructuur voor de vervoermiddelen, maar dit staat op gespannen voet met de kwaliteit van de leefomgeving in een dichtbevolkt land als Nederland. De ruimte om de infrastructuur uit te breiden is spaarzaam aan het worden, vanuit je woning wil je een mooi stuk landschap zien en geen stukken asfalt met rijdend staal, in de woonkamer wil je rustig tv kijken zonder storind door het geluid van de auto's buiten. De overheid heeft de taak om in dit spanningsveld een compromis te vinden om zowel de automobilist als de burger tevreden te houden [Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004; Achterhuis and Elzen, 1998].

3.1.3 Brandstofvoorziening

In Nederland zijn drie hoofdtypes brandstof leverbaar voor de auto, namelijk: benzine, diesel en LPG. Het Nederlandse wagenpark was aan het eind van 2002 zo samengesteld dat 81% van de personenauto's benzine als brandstof had, 14% diesel en 5% LPG. Als gekeken wordt naar het brandstofverbruik voor het totale verkeer & vervoersysteem dan liggen de verhoudingen anders, namelijk : 51,3% diesel, 41,8% benzine en 6,9% LPG. Verklaring voor het hogere verbruik van diesel t.o.v. benzine, terwijl het wagenpark een ander beeld laat zien, ligt in het weggebruik van benzine- en dieselveertuigen. Hoe groter de afgelegde afstand hoe voordeliger diesels in gebruik zijn ten opzichte van benzine-auto's (het kantelpunt ligt ongeveer bij 20.000 kilometer). Daarbij komt nog dat in het brandstofverbruik ook vrachtwagens meegenomen zijn en deze hebben vrijwel allemaal een dieselmotor hebben [BOVAG, 2004; Autogas, 2004; Milieu Centraal, 2004].

Om de drie brandstoftypes met elkaar te vergelijken zijn in tabel 3.1 de belangrijkste eigenschappen naast elkaar gezet. Per eigenschap is aangegeven hoe de eigenschap zich verhoudt ten opzichte van benzine. In de tabel is zichtbaar dat diesel een 14% hogere energiedichtheid heeft dan benzine en dat LPG daar een 27% lagere energiedichtheid heeft. Aan de emissiekant is gekeken naar de uitstoot van koolmonoxide (CO), stikstofdioxiden (NO_x), vluchtige organische stoffen² (VOS), kooldioxide (CO₂) en deeltjes (PM). Hierbij valt op dat diesel met name op stikstofdioxiden en deeltjes een grotere uitstoot heeft t.o.v. benzine. LPG komt hierbij uit de vergelijking als de schoonste brandstof [Nederlandse Waterstof Vereniging, 2004; Elzen et al., 1996]. In paragraaf 3.3.3 wordt verder ingegaan op de schadelijke effecten van de emissies voor het voor de gezondheid, milieu en het klimaat. Per type brandstof wordt nog even kort aangegeven hoe deze verkregen wordt

en wat de plus- en minpunten zijn ten opzichte van de andere types. Tot slot wordt aangegeven hoe de brandstofprijs aan de pomp bepaald wordt.

Brandstof	Energiedichtheid	CO	NO _x	CO ₂	VOS	SO ₂	Deeltjes
Benzine	1	1	1	1	1	1	1
Diesel	1,14	0,8	2	0,8	0,5	0,25	3,33
LPG	0,73	0,8	0,3	0,8	0,3	-	-

Tabel 3.1: Eigenschappen van hoofdtypen brandstoffen voor de auto [Elzen et al., 1996; Nederlandse Waterstof Vereniging, 2004]

Benzine

Benzine wordt gemaakt uit aardolie en is een mengsel van koolwaterstoffen aangevuld met additieven om de eigenschappen te verbeteren. Doordat benzine van nature vloeibaar is en vrij eenvoudig verdampt is het een goede brandstof voor een verbrandingsmotor. In vergelijking met diesel heeft benzine als voordeel dat er een relatief kleine, lichte en stille motor nodig is waarbij weinig roet uitgestoten wordt. Aan de andere kant levert benzine een grotere bijdrage aan het broeikas effect (20% meer uitstoot van CO₂ ten opzichte van diesel), is minder zuinig dan diesel (door de lagere energiedichtheid) en minder robuust [EMIS, 2004; Brain, 2004a].

De samenstelling van benzine is in de loop der jaren veranderd. Vroeger werd lood toegevoegd aan de benzine om de klopvastheid te vergroten, maar hiervoor zijn andere additieven in de plaats gekomen. Verder is benzine zwavelarm geworden en is het gehalte aan benzeen flink verminderd. Vanaf 1990 is de driewegkatalysator verplicht geworden voor nieuwe benzineauto's waardoor de uitstoot van stikstofoxiden met een derde is verminderd en de uitstoot van roetdeeltjes met 40% is verminderd [EMIS, 2004; Garvelink, 2004a].

Diesel

Diesel wordt uit aardolie gemaakt en is een mengsel van koolwaterstoffen en additieven. Doordat in diesel zwaardere en langere koolwaterstofketens voorkomen in vergelijking met benzine, heeft diesel een hogere energiedichtheid dan benzine, maar is ook minder vluchtig. Door diesel vloeibaar in verhitte lucht te injecteren verbrandt deze en ontstaat een mechanische beweging [Brain, 2004b; EMIS, 2004].

Door technologische vooruitgang, zoals brandstofinjectie, doen diesels qua prestaties niet meer onder voor benzinemotoren, terwijl de robuustheid en het lagere verbruik per kilometer als voordelen zijn gebleven. Als brandstof heeft diesel een lagere CO₂-uitstoot ten opzichte van benzine, maar daar staat tegenover een hogere uitstoot van stikstofoxiden en roetdeeltjes. Door de euro4-richtlijn en accijnsverlagingen is diesel vrijwel alleen nog zwavelarm leverbaar [EMIS, 2004; Garvelink, 2004a].

LPG

LPG is een mengsel van vluchtige koolwaterstofverbindingen uit aardolie en aardgas. LPG is een afvalproduct dat vrij komt bij de winning van aardolie en aardgas en de raffinage van de aardolie. Onder normale omstandigheden is LPG gasvormig, maar door een lichte overdruk (6 tot 8 bar) wordt LPG vloeibaar. LPG is een mengsel van voornamelijk

propaan en butaan. Afhankelijk van de temperatuur wordt de verhouding tussen propaan en butaan aangepast om de druk voldoende te houden [EMIS, 2004].

Het grootste voordeel van LPG ten opzichte van benzine en diesel is de lage kostprijs per liter. Dit wordt gerealiseerd door een combinatie van een lage accijns en doordat LPG normaliter als afvalproduct geloosd zou worden door de oliemaatschappijen. LPG heeft een lagere energiedichtheid waardoor het verbruik hoger ligt, maar aan de emissiekant is LPG veel schoner door een lagere CO₂ uitstoot ten opzichte van benzine en nauwelijks uitstoot van deeltjes. Nadeel van LPG is dat het een aparte LPG-installatie vereist naast de benzinemotor waardoor er minder bagageruimte in de auto overblijft. Daarnaast valt de auto in een hogere categorie van wegenbelasting ten opzichte van benzineauto's [EMIS, 2004; Autogas, 2004].

Opbouw brandstofprijzen

De brandstofprijs die aan de benzinepomp betaald moet worden voor een liter brandstof is te verdelen in twee delen namelijk een deel voor accijns en de productieprijs. De accijns is een verbruiksbelasting die op diesel en benzine geheven wordt (en niet op LPG). Jaarlijks wordt de hoogte van de accijnzen vastgelegd door de overheid waarbij het normaliter om een inflatiecorrectie gaat. Om politieke redenen, zoals het opvangen van een begrotingstekort, is het mogelijk dat er verdere aanpassingen van de accijnshoogte plaatsvinden (zoals het kwartje van Kok uit 1991) [Shell, 2004; Ministerie van Financiën, 2004].

De productieprijs is opgebouwd uit: de ruwe olieprijs, de dollarkoers, raffinagekosten, transportkosten, personeelskosten, promotiekosten, de vraag naar brandstoffen en een winstmarge. De vraag neemt toe door onzekerheid in de brandstofvoorziening, zoals terroristische dreigingen, problemen in het productieproces en de beperkte leverbaarheid en beschikbaarheid van brandstoffen. Vooral de prijs van ruwe olie leidt tot fluctuaties in de brandstofprijs [Shell, 2004; OPEC, 2004; National Geographic, 2004].

In tabel 3.2 is te zien hoe marktleider Shell de verkoopsadviesprijs (op 1 september 2004) voor de verschillende brandstoffen opbouwt. Deze adviesprijs dient als indicatie voor de tankstations wat een redelijke pompprijs zou zijn voor een liter brandstof. Te zien is dat voor benzine in totaal 68.8%, voor diesel 56.6% en voor LPG 19% van de brandstofprijs aan belastingen betaald worden. Shell geeft op haar website ook aan hoe de productieprijs voor een liter benzine (euro 95 ongelood) opgebouwd is. Ongeveer 22,5 eurocent per liter wordt uitgegeven om ruwe olie te kopen en deze om te zetten in de benzine die verkocht wordt aan de pomp. Zeven eurocent is noodzakelijk om de directe en indirecte kosten te dekken, zoals: transport, opslag, marketing personeel, etc. De benzinepompen hebben een marge van vijf eurocent om alle exploitatiekosten van de pomp te dekken waarbij ongeveer één eurocent voor de benzinepompen overblijft als winst. Per liter benzine maakt Shell een winst van één eurocent [Shell, 2004]

	Benzine	Diesel	LPG
Productieprijs	0.39	0.39	0.36
Accijns	0.67	0.37	0.00
BTW	0.19	0.14	0.07
Totaal	1.25	0.90	0.43

Tabel 3.2: Overzicht van brandstofprijs (in euro) onderverdeeld naar productieprijs, accijns en BTW [Shell, 2004]

3.2 Openbaarvervoerdiensten

De openbaarvervoerdiensten kenmerken zich doordat ze in beginsel voor iedereen toegankelijk zijn en de potentie hebben om in vergelijking met de auto grotere hoeveelheden mensen per tijdseenheid te vervoeren. Er wordt een onderscheid gemaakt binnen de openbaarvervoerdiensten tussen: lange afstandvervoerdiensten, korte afstandvervoerdiensten en vervoer op maat. De lange afstandvervoerdiensten, zoals de trein en het vliegtuig, bieden reizigers de mogelijkheid om relatief snel lange afstanden af te leggen. De reiziger wordt in de richting van de bestemming gebracht, maar moet vaak gebruik maken van andere openbare diensten om binnen loopafstand van de bestemming te komen. De korte afstandvervoerdiensten, zoals de tram, bus en metro, beperken zich meer tot de stedelijke omgeving. Binnen deze omgeving worden mensen dicht bij de plaats van bestemming gebracht. Zowel de korte als de lange afstandvervoerdiensten verplaatsen zich langs een vast traject waar op regelmatige plekken stopplaatsen zijn aangebracht. Door middel van een dienstregeling wordt aan de reiziger aangegeven wanneer het vervoermiddel op de desbetreffende plek stopt. De vervoerdiensten op maat, zoals de taxi, bieden een reiziger de mogelijkheid om van deur tot deur te reizen, maar deze moeten besteld worden en zijn relatief duur [Hoogma et al., 2002].

Voor veel reizigers zijn de openbaarvervoerdiensten niet aantrekkelijk. Reizigers beschouwen het openbaar vervoer als een dure manier van reizen, doordat ze het vergelijken met de marginale kosten van het autorijden, zoals de brandstofkosten, en de andere kosten die de auto met zich meebrengt vergeten, zoals de wegenbelasting. In tabel 3.3 is te zien dat een auto per km² een factor twee tot drie duurder is in vergelijking met openbaar vervoer. Om van deur tot deur te reizen is het vaak noodzakelijk om over te stappen op vaste locaties. Hierbij komt het regelmatig voor dat er een slechte aansluiting is tussen de verschillende vervoerdiensten, zoals de bus en de trein. Gevolg is dat de reistijd voor de reiziger relatief lang is in verhouding met de auto. In de openbare vervoermiddelen zitten vaak relatief veel mensen in een kleine ruimte bij elkaar, waardoor er nauwelijks ruimte is voor wat privacy. Het is niet mogelijk om een rustige conversatie met een meereizende collega te voeren, zonder dat anderen meeluisteren. Een ander probleem waarmee de openbaarvervoerdiensten kampen is het onveilige imago. Op bepaalde trajecten en tijdstippen voelen mensen zich niet meer veilig en vermijden daardoor de openbaarvervoerdiensten. Werknemers van de vervoersbedrijven zijn moeilijker gemotiveerd te houden en het wordt moeilijker om nieuwe werknemers te werven. De openbaarvervoerdiensten kampen tot slot met dezelfde problemen als de auto, alleen per reiziger zijn deze problemen kleiner. Een reiziger in de openbaarvervoerdiensten neemt minder ruimte in, de energieconsumptie is lager en daarmee ook de emissies van luchtvervuilende, gezondheidsbedreigende en broeikasgassen [Hoogma et al., 2002; Van A naar Beter, 2003; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004].

Vervoersvorm	1980	1985	1990	1995	2000
Auto	29	29	32	35	36
Trein	10	12	11	13	12
Stad- en streekvervoer	15	19	21	22	22

Tabel 3.3: Reiskosten in eurocent per kilometer voor verschillende vervoersvormen [Adviesdienst Verkeer en Vervoer, 2003]

² hierbij is rekening gehouden met de volgende kostenposten: vaste kosten, afschrijvingskosten, verzekering, motorrijtuigenbelasting, variabele kosten, verbruikskosten en onderhoudskosten

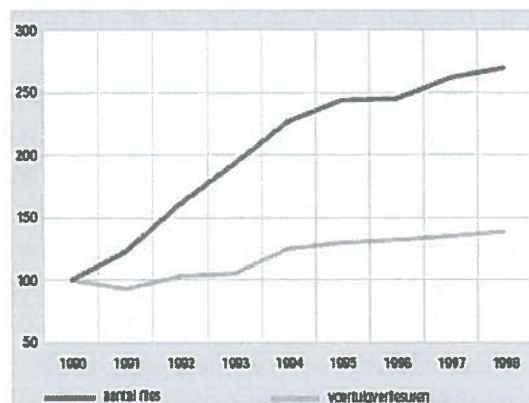
3.3 Probleemgebieden

Van de problematiek in het personenvervoerregime worden de drie belangrijkste probleemgebieden in deze paragraaf besproken, namelijk: congestie, bereikbaarheid & leefbaarheid en milieuvervuilende emissies.

3.3.1 Congestie

Voor welvaart en welzijn, of economische voorspoed, is het noodzakelijk om een goed systeem te hebben voor het vervoeren van personen en goederen. De mobiliteit van personen is alleen mogelijk als de bestemmingen bereikbaar zijn. Naar verwachting neemt het aantal reizigerskilometers in 2020 toe met twintig tot dertig procent ten opzichte van 1995. Om deze groei van mobiliteit mogelijk te maken is het noodzakelijk om de bereikbaarheid voor reizigers te verbeteren [Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004; Van A naar Beter, 2004].

In de gehele Nederlandse infrastructuur rondom transport treedt congestie op. In figuur 3.3 is te zien hoe het aantal files en de daarbijbehorende verliesuren in de periode van 1990 - 1998 zijn toegenomen. Voor deze toename zijn meerdere factoren aan te wijzen. Allereerst is het wagenpark in Nederland toegenomen van 5,6 miljoen voertuigen in 1995 naar ruim 7,9 miljoen in 2003. In 1995 was gemiddeld per 0,86 auto per huishouden beschikbaar, inmiddels is dit in 2003 toegenomen tot gemiddeld 0,98 auto per huishouden. Ten tweede is de mobiliteit van de Nederlander toegenomen. Een derde factor die een rol speelt is de capaciteit van de infrastructuur voor de mobiliteit en de ruimte die beschikbaar is om de infrastructuur uit te breiden. De vierde factor die een rol speelt is het onregelmatige rijgedrag tijdens files. Doordat de voertuigsnelheid onregelmatig is, ontstaat een vertragend effect waardoor de file verder vergroot wordt. Tot slot is er nog een factor van verstoringen die leiden tot tijdelijke congestie. Deze verstoringen bestaan uit onder andere wegwerkzaamheden en ongelukken waardoor de wegcapaciteit lokaal afneemt [BOVAG, 2004; De Verkeersinformatiedienst, 2004; CBS, 2004].



Figuur 3.3: Aantal files en verliesuren in de periode 1990 - 1998 [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1999]

3.3.2 Bereikbaarheid en Leefbaarheid

Leefbaarheid is een probleem dat moeilijk definieerbaar is, doordat er een heleboel aspecten een rol bij spelen die gevoelsmatig door mensen bepaald worden. Veiligheid, geluidsoverlast, het woonklimaat en de natuur vallen onder leefbaarheid. Nederland is een dichtbevolkt land waardoor woongebieden vlak naast de infrastructuur van wegen liggen. Bereikbaarheid is het probleem dat bestemmingen bereikbaar blijven. Oplossingen voor het verbeteren van de bereikbaarheid botsen daardoor met de leefbaarheid en vice versa. De overheid heeft de taak op zich genomen om leefbaarheid en een hoge mobiliteit met elkaar samen te laten gaan [Natural Welfare, 2003; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004].

3.3.3 Milieu

Op het gebied van milieu wordt een globaal onderscheid gemaakt naar kortere en langere termijn problemen. Onder kortere termijn problemen vallen de emissies die de lucht vervuilen, maar ook de gezondheid bedreigen. De langere termijn problemen worden gevormd door de klimaatveranderende emissies. Beide worden kort besproken.

Luchtvervuilende en gezondheidsbedreigende emissies

Door het gebruik van verbrandingsmotoren in de vervoermiddelen worden allerlei schadelijke stoffen uitgestoten (emissies) die het milieu direct aantasten en ook de gezondheid van de mens bedreigen. De belangrijkste luchtvervuilende en gezondheidsbedreigende stoffen van het personenvervoer worden hier kort besproken.

Koolmonoxide (CO) is een giftige stof die ontstaat door onvolledige verbranding van de brandstof. Bij inademing bindt de koolmonoxide zich permanent aan de hemoglobine in het bloed, waardoor het transport van zuurstof in het lichaam verminderd wordt. In hoge concentraties is koolmonoxide dodelijk, in lagere concentraties raken lichaamsorganen onherstelbaar beschadigd door de aantasting van de luchtwegen. In afgesloten ruimtes, zoals tunnels en garages, of bij druk verkeer kan de concentratie koolmonoxide tot gevaarlijke niveaus toenemen. Van de totale emissie van koolmonoxide is het wegverkeer voor 50% verantwoordelijk [EMIS, 2004; BOVAG, 2004; Elzen et al., 1996].

Stikstofoxiden (NO_x), bestaande uit vooral stikstofoxide (NO) en stikstofdioxide (NO_2), vormen de belangrijkste stoffen die aanleiding geven tot directe effecten op de gezondheid. Stikstofoxiden reageren met regenwater tot salpeterzuur. Stikstofdioxiden tasten de luchtwegen aan en brengt permanente schade toe aan het longweefsel. Het wegverkeer is, met ruim 50%, de belangrijkste veroorzaker van NO_x -emissies en dan vooral de dieselauto's. Naast de gezondheidsbedreiging leveren de stikstofoxiden ook een belangrijke bijdrage, ongeveer 25%, aan de verzuring van de lucht en de bodem. Door verzuring krijgen planten en bomen moeite met groeien en worden gebouwen aangetast. In de zomer leveren de stikstofoxiden een bijdrage aan zomersmog³ [EMIS, 2004; BOVAG, 2004; Elzen et al., 1996; Milieuloket, 2004b].

Kleine deeltjes (PM), of roetdeeltjes, bestaan uit restanten van olie en brandstof die na verbranding over blijven. Door de kleine diameter ($<1 \mu\text{m}$) leidt inademing tot irritatie in neus en keel, maar treedt ook irritatie bij de ogen en oren op. Langdurige blootstelling aan kleine deeltjes leidt tot chronische longziekten, zoals bronchitis en astma. Kleine deeltjes worden ook beschouwd als kankerverwekkend. Naast de gezondheidsbedreigende eigenschappen van de kleine deeltjes, dragen kleine deeltjes bij aan de luchtvervuiling in de vorm van smog. In het personenvervoer zijn met name diesels verantwoordelijk voor de emissie van kleine deeltjes. Op dit moment is de emissie van PM10 (deeltjes kleiner dan $10 \mu\text{m}$) gereguleerd, maar de laatste tijd vormt de regulering van PM2 ($<2 \mu\text{m}$) ook onderdeel van de discussie [EMIS, 2004; Elzen et al., 1996; Milieuloket, 2004b].

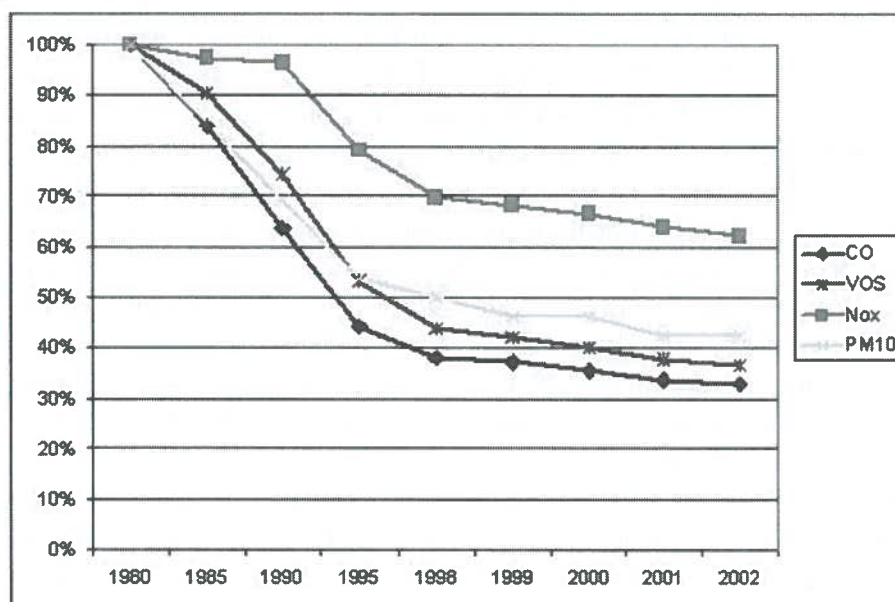
Vluchtige Organische Stoffen (VOS) bestaan uit een grote scala aan koolwaterstoffen

³Smog is een tijdelijke verontreiniging van de lucht, die gezondheidsbedreigend is en schadelijk is voor de planten en bomen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen zomer- en wintersmog. Zomersmog, of fotochemische verontreiniging, ontstaat doordat een mengsel van stikstofoxiden, vluchtige organische stoffen en kleine deeltjes niet verspreid worden door de wind. In de stilstaande lucht ontstaat onder invloed van zon chemische reacties waarbij ozon vrijkomt. De wintersmog bestaat uit een mengsel van zwaveldioxide en kleine deeltjes, die door de temperatuurverschillen in de luchtlagen dicht bij de grond blijft hangen. Door veranderingen in de weersomstandigheden, zoals regen, is smog over het algemeen weer snel verdreven [Milieuloket, 2004b].

die de gezondheid schaden. Benzeen en 1,3-butadien zijn de twee meest kankerverwekkende stoffen. Andere VOS bedreigen de gezondheid indirect via smog en ozonvorming. Vooral benzinemotoren vormen een bron voor de emissie van VOS. Binnen de definitie van VOS is er een verschil tussen Amerika en Europa. Als gekeken wordt naar de definitie van VOS, dan valt het broeikasgas methaan ook onder de definitie. In Amerika wordt methaan buiten de VOS-regulering gehouden terwijl dit onderscheid in Europa niet gemaakt wordt [EMIS, 2004; Elzen et al., 1996].

Zwavel dioxide (SO_2) wordt in combinatie met water zwavelzuur dat schade aan de luchtwegen veroorzaakt. Bij langdurige blootstelling aan zwavel dioxide leidt dit tot chronische bronchitis en verhoogde kans op infecties. Doordat het zwavelgehalte van SO_2 in benzine en met name in diesel drastisch verminderd is, is de emissie van SO_2 ten opzichte van andere stoffen verwaarloosbaar geworden [EMIS, 2004; BOVAG, 2004; Elzen et al., 1996; Milieuloket, 2004b].

In figuur 3.4 is te zien hoe de emissies van het totale wegverkeer in Nederland vanaf 1980 een dalende trend laten zien. Deze emissiedaling is een gevolg van de Europese emissienormen en de verplichte invoering vanaf 1992 van de katalysator in nieuwe benzinevoertuigen [EMIS, 2004].



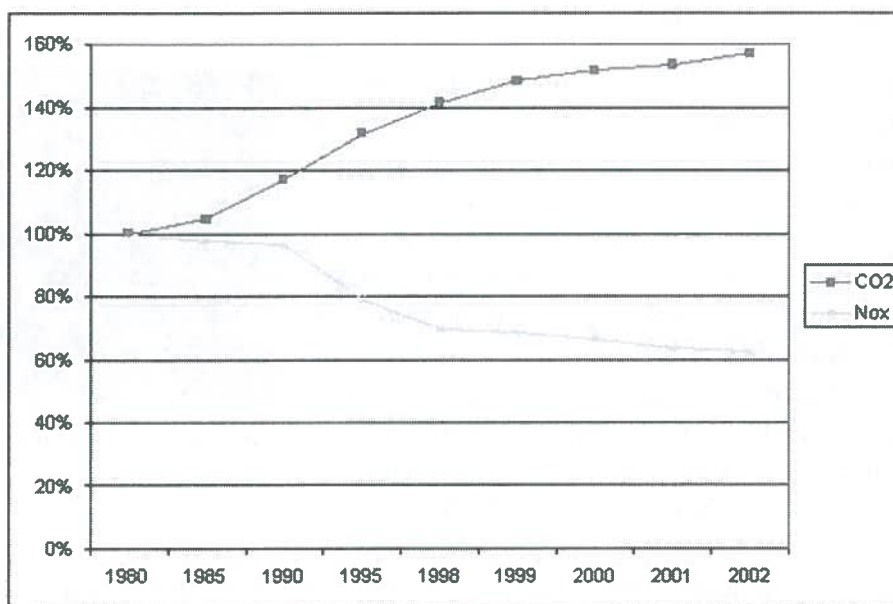
Figuur 3.4: Luchtvervuilende en gezondheidsbedreigende emissies ten gevolge van het wegverkeer waarbij het niveau van 1980 gelijk is aan 100% [BOVAG, 2004]

Klimaatveranderende emissies

In de discussies rondom de gevolgen van het menselijke handelen voor de aarde is het broeikaseffect een belangrijk onderwerp. Het broeikaseffect is een natuurlijk effect dat als een vorm van warme deken om de aarde te beschouwen is. Zonder deze deken zou de warmte van de zon teruggekaatst worden de ruimte in waardoor de gemiddelde temperatuur op aarde zou dalen tot $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Door de aanwezigheid van broeikasgassen, zoals waterdamp en kooldioxide, in de atmosfeer wordt een deel van de warmte vastgehouden in de dampkring rondom de aarde. Van nature is dit proces ook aanwezig op de aarde, waardoor de gemiddelde temperatuur rond de $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ligt. Het broeikaseffect wordt veroorzaakt door menselijk handelen waardoor het opwarmen van de dampkring versterkt raakt. Dit

versterken wordt bereikt door meer broeikasgassen in de atmosfeer te brengen met als resultaat dat de gemiddelde temperatuur op de aarde stijgt. Deze temperatuurstijging leidt vervolgens tot een klimaatverandering, het smelten van de ijskappen waardoor het water-niveau stijgt en er meer overstromingen komen, extreme weersomstandigheden, droogte en het ongeschikt raken van landbouwgrond [Milieuloket, 2004a; Ministerie van VROM, 2004a].

Binnen het personenvervoer wordt aan het broeikas effect een bijdrage geleverd door de emissie van met name kooldioxide (CO_2), maar ook de stikstofoxiden (NO_x). In figuur 3.5 is te zien hoe de emissies van CO_2 in de afgelopen jaren alleen maar is toegenomen. In totaal wordt de totale bijdrage van het verkeer & vervoersysteem aan het broeikas effect op ruim 20% geschat. Per kilometer leveren de benzineauto's de grootste bijdrage aan het broeikas effect, maar doordat dieselauto's langere afstanden afleggen is de totale bijdrage van diesel- en benzineauto's aan het broeikas effect ongeveer gelijk [Elzen et al., 1996; Goldewijk et al., 2004; BOVAG, 2004; EMIS, 2004; Milieuloket, 2004b; RIVM, 2004d].



Figuur 3.5: Broeikasgasemissies ten gevolge van het wegverkeer waarbij het niveau van 1980 gelijk is gesteld aan 100% [BOVAG, 2004]

3.4 Trends binnen het regime



Figuur 3.6: Impressie van differentiatie voertuigaanbod [Ford, 2004]

Binnen het regime van het personenvervoer zijn een aantal trends te onderscheiden die het gevolg zijn van de interne marktdynamiek en de pogingen van de overheid om de problemen te reguleren.

3.4.1 Ontwikkelingen van de auto

In de tweede helft van de twintigste eeuw werd de concurrentie tussen de autoproducenten sterker, waardoor steeds sneller nieuwere producten en accessoires ontwikkeld werden. Eén van de effecten was een grotere differentiatie in het voertuigaanbod. Tot ongeveer 1980 was de all-purpose auto (de sedan en stationwagon) het meest gebruikte type. Rond de eeuwwisseling was het aanbod van autotypes verbreed (zie figuur 3.6), met onder andere de stadsauto, de 'space wagon' en de 'Sport Utility Vehicle' [Elzen et al., 2004].

Het aantal auto's per huishouden is van 0,86 in 1995 toegenomen naar 0,98 in 2003. Het aantal huishoudens dat één auto als vervoermiddel heeft is van 60% in 1995 afgenomen naar 55% in 2002. Daar staat tegenover dat het aantal huishoudens met twee of meer auto's is gestegen van 14% in 1995 naar 21% in 2002. Eén van de verklaringen hiervoor is dat vrouwen steeds meer buitenshuis zijn gaan werken en daarvoor dus ook steeds vaker een auto als vervoermiddel nemen. De groep van huishoudens zonder auto is langzaam dalende van 26% in 1995 naar 24% in 2002 [CBS, 2004; BOVAG, 2004; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1997].

Een andere ontwikkeling van de laatste jaren is dat de zwaardere klasse van auto's een steeds groter marktsegment is gaan innemen in het totale wagenpark. Met name het aandeel van de 'Sport Utility Vehicle' (zie figuur 3.7) in het wagenpark is sterk stijgend. In Amerika zijn de oorzaken en gevolgen van deze trend onderzocht. Als reden tot aanschaf voor een SUV lijkt het motief te zitten dat de mens de natuur en zijn medemens wil domineren. De fysieke omvang en uitstraling van de SUV dwingen medeweggebruikers om ruim baan te maken voor een aanstormende SUV, de vierwielaandrijving maakt de SUV geschikt om op alle terreinen te rijden. De SUV geeft zijn / haar bestuurder een veiliger gevoel door een hogere wegligging, dat een beter zicht op de weg biedt, maar dit leidt ook tot risicovoller rijgedrag. In Amerika is de kans op een ongeluk met een SUV drie keer zo hoog als met een all-purpose auto. Deze zwaardere klasse auto's zijn ook minder efficiënt in hun brandstofverbruik, waardoor het milieu extra belast wordt [Mom, 2004; BOVAG, 2004].



Figuur 3.7: Toyota RAV4 [Toyota, 2005]

Door ontwikkeling van de dieseltechnologie doet de dieselmotor niet meer onder voor de benzinemotor qua prestaties en biedt zelfs meer voordelen voor de gebruiker, zoals een hoger koppel en lager brandstofverbruik. In de afgelopen jaren is hierdoor een groei ontstaan in het wagenpark met dieselmotoren. In 2003 is de verkoop van nieuwe voertuigen met dieselmotoren gestegen ten opzichte van 2002 van 21,6% naar 22,9%. Doordat in Nederland de wet- en regelgeving de dieselmotor financieel minder aantrekkelijk maakt, maakt de diesel een minder snelle opkomst dan in andere landen in de EU. Aan de emissiekant hebben dieselmotoren als pluspunt ten opzicht van benzine een lagere CO₂-uitstoot (20% ten opzichte van benzine), wat gunstig is voor de aanpak van het broeikaseffect. Aan de negatieve kant staat dat diesels meer luchtvervuiling veroorzaken. Diesels stoten 70% meer kleine deeltjes uit dan benzine, die verantwoordelijk gehouden worden voor het voortijdige overlijden van vijfduizend Nederlanders per jaar [RIVM, 2004c; Garvelink, 2004a; Elzen et al., 1996].

Een laatste trend in de ontwikkeling van de auto die genoemd wordt is de toevoeging van steeds meer technische gadgets aan de auto. Om het rijden in de auto comfortabeler

en gemakkelijker te maken zijn de laatste jaren verschillende technologieën ontwikkeld, onder andere: cruise control, stuurbekrachtiging, airco, navigatiesystemen en de parkeerassistent. Aan de entertainment kant zijn er voor de automobilist ook veel meer mogelijkheden, zoals de autoradio, GSM met handsfreetkit, etc. Gevolgen van deze toevoegingen is dat de elektrische energieconsumptie van een auto sterk toeneemt.

3.4.2 Brandstofvoorziening

De opbouw van de brandstofprijs (zie 3.1.3) laat zien dat met name de productieprijs voor brandstoffen onderhevig is aan schommelingen en dat de accijnzen en winstmarges vrij constant zijn. Nederland is voor de brandstofvoorziening, evenals bijvoorbeeld Amerika, sterk afhankelijk van de olie-exporterende landen. Voor landen met een hoge mobiliteit is het voor de economie van belang dat de brandstofvoorziening gegarandeerd kan worden. Wanneer er enige onzekerheid bestaat over de brandstofvoorziening ontstaat een hamstereffect van brandstoffen bij de afhankelijke landen.

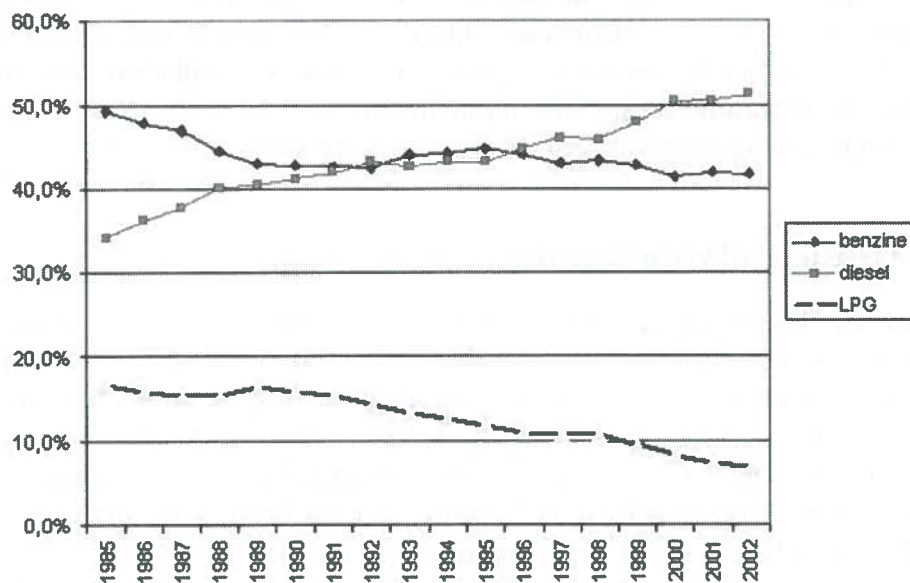
Ongeveer tweederde van de ruwe olievoorraden bevindt zich in het Midden-Oosten. Deze regio is niet het toonbeeld van stabiliteit. Naast de langdurige conflicten tussen de verschillende landen in het Midden-Oosten vormt het terrorisme een reële dreiging voor de oliebronnen [Shell, 2004; OPEC, 2004; National Geographic, 2004]. Een tweede probleem voor de brandstofvoorziening is de voorraad van fossiele brandstoffen op de wereld in combinatie met de vraag ernaar. Op de aarde is een eindige voorraad fossiele brandstoffen beschikbaar en de vraag naar de brandstoffen blijft stijgen. Momenteel wordt nog aan de vraag, van ongeveer 80 miljoen vaten per dag, voldaan worden met behulp van conventionele (makkelijk te winnen) bronnen, maar de maximale productiehoeveelheid komt in zicht. Er zou ook voor onconventionele bronnen gekozen kunnen worden om te gaan gebruiken, zoals teerzand in Canada, maar dit brengt hoge winningkosten met zich mee en is vaak zeer schadelijk voor het milieu en de omgeving. De verwachting wanneer het maximale productieniveau bereikt wordt varieert tussen 2006 en 2040 [National Geographic, 2004]. BP verwacht in elk geval voor de komende veertig jaar voldoende olie te kunnen leveren voor haar klanten [British Petroleum, 2004].

Deze problemen vormen de drijfveer om onderzoek te verrichten naar alternatieve energieketens. Deze energieketens moeten het liefst de mogelijkheid aan een land bieden om zo veel mogelijk onafhankelijk van andere landen de energievoorziening zeker te stellen. In dit kader vormen biobrandstoffen, waterstoftechnologie en duurzame energiebronnen (zoals zon, wind en water) onderzoeksgebieden voor alternatieve energieketens.

Als gekeken wordt naar de hoeveelheid brandstof die door tankstations in Nederland verkocht wordt voor het gehele vervoerssysteem (zie figuur 3.8) dan wordt de trend van verdieseling ook zichtbaar. Tegelijkertijd is te zien dat het aandeel van LPG vanaf 1989 een dalende is en dat het aandeel van benzine vanaf 1989 schommelt rondom een waarde van 42% [BOVAG, 2004]

3.4.3 Voertuigemissies

De bezorgdheid om de toestand van het milieu in de wereld voor de huidige en toekomstige generaties mensen is in de afgelopen jaren een steeds belangrijker punt geworden op de politieke agenda. Op de politieke agenda wordt er een onderscheid gemaakt tussen broeikasgasemissies, luchtverontreinigende en gezondheidsbedreigende emissies. Sinds de jaren 60 vormt de stijgende lokale vervuiling een belangrijk thema voor milieuactivisten.



Figuur 3.8: Levering van brandstoffen aan de binnenlandse markt [BOVAG, 2004]

Inmiddels is dit omgeslagen naar een bezorgdheid om de gevolgen van het menselijk handelen op de wereldwijde biologische ecosystemen [Hoed, 2004a].

Vanaf omstreeks 1980 werd het mogelijk om relaties te leggen tussen het menselijke handelen en de gevolgen voor de biologische ecosystemen. Zure regen, gaten in de ozonlaag, nucleaire rampen (zoals Tsjernobyl), het stijgende broeikaseffect konden gekoppeld worden aan menselijk handelen. Vanaf deze periode veranderde de bezorgdheid om de natuur in een bezorgdheid om de onomkeerbare gevolgen van het menselijke handelen. De CO₂-emissies zijn in die periode hoger op de politieke agenda komen te staan. Om economische groei in combinatie met verbetering van het milieu mogelijk te maken wordt vertrouwd op de ontwikkeling van duurzame technologieën [Hoed, 2004a; Elzen et al., 1996].

In 1987 werd door de World Commission on Environment and Development (WCED) in de publicatie "Our Common Future" duurzame ontwikkeling gedefinieerd als: "het voldoen aan de vraag van de huidige generatie, zonder dat er gevaren ontstaan voor toekomstige generaties om in hun behoeftes te worden voorzien". Door de Business Council on Sustainable Development, een belangrijke vertegenwoordiger van de industrie, is de definitie vertaald, omdat de WCED-definitie te veel interpretatieruimte overlaat, naar: "de levering van competitief geprijsde goederen die aan de menselijke behoeftes voldoen en de kwaliteit van het leven verbeteren, terwijl tegelijkertijd de ecologische impact gereduceerd wordt zodat de benodigde grondstoffen voor productie in evenwicht komt met de draagbare capaciteit van de aarde" [Hoed, 2004a].

Om naar een duurzame wereld te gaan worden op internationaal niveau allerlei afspraken gemaakt. Zo werd in 1992 het Raamverdrag klimaatverandering van de Verenigde Naties afgesloten waarmee onder andere Nederland heeft afgesproken om de broeikasgasconcentratie in de atmosfeer te stabiliseren, zodat een gevaarlijke menselijke invloed op het klimaat voorkomen wordt. In 1997 is het Klimaatverdrag uitgebreid met het Kyoto-protocol, omdat stabilisatie onvoldoende bleek om het klimaat te beschermen. In dit protocol staan afspraken waarbij de broeikasgasemissie verminderd moeten zijn met een bepaald percentage ten opzichte van 1990. Voor Nederland is door de Europese Unie vastgesteld dat in 2008 - 2012 een emissiereductie van 6% ten opzichte van 1990 gerealiseerd

moet worden voor de broeikasgassen [Ministerie van VROM, 2004b].

In 1998 heeft de Europese auto-industrie, later gevolgd door de Japanse en Koreaanse auto-industrie, vrijwillig een verdrag gesloten met de Europese Commissie om de CO₂-uitstoot van auto's te verminderen. De autofabrikanten hebben afgesproken dat ze in 2008 25% minder CO₂-uitstoot bewerkstelligen over het gehele nieuwe wagenpark ten opzichte van 1995. Dit betekent dat in 2008 een nieuwe auto gemiddeld 140 gram per km uitstoot. In 2012 wil de EC deze uitstoot teruggeschroefd hebben naar 120 gram per km. Verder is de auto-industrie verplicht om automobilisten te informeren over brandstofzuinigheid en mogen de lidstaten energiezuinige auto's promoten met belastingvoordelen. Voor het niet halen van de afspraken zijn geen sancties vastgelegd [Hoed, 2004a; Hoogma, 2005].

Voor de luchtverontreinigende en gezondheidsbedreigende emissies zijn vanaf 1992 verschillende normeringen vanuit de Europese Unie ingegaan. Deze normeringen geven de emissie-eisen voor nieuwe voertuigen aan in gram per kilometer. In tabellen 3.4 en 3.5 is een overzicht weergegeven van de euronormeringen zoals die nu zijn vastgelegd door de Europese Unie voor benzine- en dieselauto's (voor dieselveertuigen is de euro 5 normering aangekondigd maar nog niet vastgelegd) [EMIS, 2004; Hoed, 2004a].

	Ingangsdatum	CO	NO _x	VOS
Euro 1	1-7-1992	4.05	0.49	-
Euro 2	1-1-1996	3.28	0.25	-
Euro 3	1-1-2000	2.30	0.15	0.20
Euro 4	1-1-2005	1.00	0.08	0.10

Tabel 3.4: Emissienormen (in gram per km) voor benzineauto's [EMIS, 2004; Hoed, 2004a]

	Ingangsdatum	CO	NO _x	PM	VOS
Euro 1	1-1-1992	2.88	0.78	0.14	-
Euro 2	1-1-1996	1.06	0.73	0.10	-
Euro 3	1-1-2000	0.64	0.50	0.05	-
Euro 4	1-1-2005	0.50	0.25	0.025	-
Euro 5	1-1-2008	-	-	-	-

Tabel 3.5: Emissienormen (in gram per km) voor dieselauto's [EMIS, 2004; Garvelink, 2004b; Hoed, 2004a]

Nadat de normen vastgesteld zijn is het aan de industrie om technologie te verbeteren en ontwikkelen om de normen te realiseren. Bestaande voertuigconcepten zijn verbeterd door middel van add-on technologieën, zoals katalysatoren in de uitlaat van auto's die de luchtvervuilende emissies verminderen. De brandstof zelf is ook schoner geworden, door onder andere het weglaten van toevoegingen, zoals lood, en het verminderen van het zwavelgehalte in de brandstoffen [EMIS, 2004].

Er worden ook alternatieve voertuigconcepten ontwikkeld waarbij gezocht wordt naar alternatieve energieketens die een duurzaam karakter hebben. Zo is er onderzoek verricht naar elektrische aangedreven voertuigen. Deze hebben als voordeel dat de elektrische energie op vele manieren te produceren is, het voertuig kan emissieloos rijden en stiller worden. Een grote barrière voor deze technologie is dat elektrische energie moeilijk op te slaan is. Hierdoor moet voor elektrische voertuigen een compromis gezocht worden tussen het gewicht van de accu's en de actieradius van het voertuig [Hoed, 2004a].

Inmiddels hebben onder andere Toyota, met de Prius HSD, en Honda, met de Civic IMA, hybride voertuigen op de markt gebracht die qua energievoorziening gebruik maken van een combinatie van benzine en elektriciteit. Deze hybrides hebben als primaire motor een verbrandingsmotor. Een elektromotor die met een accu gevoed wordt springt als ondersteunende motor in op die momenten dat de verbrandingsmotor te weinig vermogen levert of als er te weinig energie over is in de accu. Door middel van het terugwinnen van energie uit beweging en remmen wordt de accu opgeladen tijdens het rijden. Deze hybrides behoren op dit moment op basis van het benzinegebruik tot de zuinigste klasse van benzinevoertuigen. Nadeel van de hybrides op dit moment is dat de technologie nog niet optimaal is en dat de prijs kunstmatig, met fiscaal voordeel, aantrekkelijk gemaakt moet worden [Garvelink, 2004b].

Naast elektriciteit en de huidige fossiele brandstoffen wordt er onderzoek verricht naar alternatieve energiebronnen waarmee een klimaatvriendelijker vervoer bereikt wordt. Hierbij wordt onder andere gedacht aan biobrandstoffen. Door eerst planten te kweken wordt een bepaalde hoeveelheid kooldioxide uit de atmosfeer opgenomen in de plant. Bij verbranding van de plant komt maximaal de opgenomen hoeveelheid kooldioxide weer vrij. Biobrandstoffen bieden de mogelijkheid aan een land om zelf de benodigde hoeveelheid planten, zoals suikerriet, voor de brandstofvoorziening te verbouwen waardoor de afhankelijkheid van andere landen voor de brandstofvoorziening afneemt. Dit biedt tevens aan de landbouw een alternatief product om te verbouwen, ter vervanging van de gewassen die nu overgeproduceerd worden. In Zweden en Japan lopen momenteel experimenten om uit organisch afval biobrandstof te halen. Biobrandstoffen hebben als nadeel dat het enorm veel land en / of afval vereist om voldoende brandstof te maken⁴ [EMIS, 2004; Elzen et al., 1996; Mallant, 2004]. Het streven van de Europese lidstaten is om in 2005 2% van de energie-inhoud van brandstoffen biologisch van aard te laten zijn. In 2010 is de doelstelling om dit te laten oplopen tot 5,75% [Ministerie van VROM, 2004a; Europees Parlement, 2003].

Tot slot is er nog onderzoek gaande naar een nieuw type aandrijving als vervanging voor de huidige verbrandingsmotor, namelijk de brandstofcel in combinatie met de elektromotor. In combinatie met de brandstofcel wordt in één adem waterstof als de ideale energiedrager van de toekomst gezien. De elektromotor biedt als voordelen dat deze stiller is en efficiënter werkt. Met behulp van brandstofceltechnologie wordt een energiedrager omgezet in elektrische energie die gebruikt wordt om de motor te voeden, maar ook de elektronica in de auto. Waterstof als brandstof heeft als voordeel dat de emissie schoon is en het op vele manieren geproduceerd kan worden. Op dit moment vormt de opslag en duurzame productie van waterstof het grootste probleem voor waterstoftechnologie [Berg, 2004; Nederlandse Waterstof Vereniging, 2004].

In het kort samengevat zijn de dominante trends op emissiegebied: fossiele brandstoffen worden langzaamaan steeds schoner, CO₂-emissies blijven stijgen door met name een groei in het wagenpark en een gebrek aan regulering en er worden alternatieve brandstoffen ontwikkelt in niches (al dan niet bijgemengd bij de bestaande brandstoffen).

3.4.4 De keuze van de reiziger voor vervoermiddel

Als gekeken wordt naar de keuze van de reiziger voor een vervoermiddel in de afgelopen jaren dan is te zien dat de verhouding tussen openbaar vervoer, auto en overige vervoermiddelen (onder andere de fiets, en lopen) vrijwel constant is gebleven in de afgelopen

⁴Om het personenvervoer in Nederland van biobrandstoffen te voorzien is ongeveer evenveel landoppervlak nodig als Nederland groot is (zie ook paragraaf 5.1.3)

tien jaar. Het aandeel van de openbaarvervoerdiensten in de totale hoeveelheid afgelegde reizigerskilometers is 12%, van de auto 76% en van de overige vervoermiddelen 12% [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001].

Afstand	Auto	OV	Overige vervoerwijzen
0 tot 5 km	32%	1%	67%
5 tot 10 km	69%	6%	25%
10 tot 15 km	76%	8%	16%
15 tot 30 km	78%	12%	10%
30 tot 50 km	79%	13%	8%
> 50 km	74%	20%	6%

Tabel 3.6: Aandeel auto en OV naar afstand in % [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001]

Tabel 3.6 laat zien hoe de verhouding tussen de openbaarvervoerdiensten en de auto is als gekeken wordt naar reisafstand. Naarmate de afstand groter wordt, neemt het aandeel van de openbaarvervoerdiensten toe. Dit is deels te verklaren met behulp van tabel 3.7 waar te zien is dat op korte afstanden het reizen met de openbaarvervoerdiensten veel meer tijd kost dan met de auto. Op langere afstanden (>30 km) wordt de verhouding tussen de de openbaarvervoerdiensten en de auto ongeveer gelijk [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001].

Afstand	Relatieve Reistijd met OV t.o.v. de auto (in %)
0 tot 5 km	5.1
5 tot 10 km	4.3
10 tot 15 km	3.7
15 tot 30 km	2.6
30 tot 50 km	1.3
> 50 km	0.9

Tabel 3.7: Reistijd met OV in verhouding met de auto naar kilometerafstand [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001]

Als gekeken wordt naar de reizigers die nu gebruik maken van de openbaarvervoerdiensten dan valt op dat dit voornamelijk onderwijs- en woonwerkverkeer is. De auto wordt voor zakelijk, huishoudelijk en recreatief vervoer gebruikt. De openbaarvervoersdiensten worden vooral gebruikt gedurende spijstijden en daarbuiten minder doordat het aanbod van de openbaarvervoerdiensten dan ook onvoldoende is [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001].

In de afgelopen jaren is het gebruik van de openbaarvervoerdiensten gedaald en naar verwachting verandert dit de komende jaren niet. Het aantal huishoudens dat afhankelijk is van de openbaarvervoerdiensten daalt ook licht [CBS, 2004]. Er is een trend vanuit de openbaarvervoerbedrijven om onrendabele lijnen op te heffen ten behoeve van de winstgevendheid. Tegenover deze afbouw van de openbaarvervoerdiensten staat het idee van de stedelijke overheden dat alleen de openbaarvervoerdiensten ervoor kunnen zorgen dat de steden leefbaar en bereikbaar blijven. Op stedelijk niveau wordt geëxperimenteerd met verschillende maatregelen om de openbaarvervoersdiensten een groter vervoersaandeel te geven. In Utrecht is bijvoorbeeld gestart met een autoluwe zone in het centrum waar

alleen openbaarvervoerdiensten rijden. In Londen loopt een experiment met de 'Congestion Charge', waarbij automobilisten tol moeten betalen om toegang te krijgen tot het centrum van de stad ⁵ [Transport for Londen, 2004; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004].

3.4.5 Modal Shift

Al vanaf 1960 vormt congestie op de wegen een punt op de politieke agenda. Tot het eind van de jaren '80 was de gedachte van de overheid dat de uitbreiding van de infrastructuur, met onder andere meer wegen, de oplossing zou vormen voor het dichtslibben van de wegen. Parallel aan de uitbreiding van de wegen nam ook het wagenpark ook sterk toe, van een half miljoen in 1962 naar 4,6 miljoen in 1985. Vanaf 1988, met de nota SVV2, werd de trend van wegen uitbreiden doorbroken, doordat de overheid een Modal Shift, een verandering in gedrag, bij de automobilist wilde bewerkstelligen. Vanuit het beleidsoogpunt zou congestie verminderd worden als de reiziger gebruik zou maken van de openbaarvervoerdiensten in plaats van de auto. Door middel van grote promotiecampagnes werd geprobeerd de Modal shift te bewerkstelligen, maar het in de praktijk bleek het niet te werken [Elzen et al., 1996].

In een tweede poging van de overheid om een modal shift te bewerkstelligen is geprobeerd om de openbaar vervoerdiensten en de auto op elkaar te laten aansluiten. Transferia moesten de automobilist aan de rand van een stad uit de auto te krijgen en in het Openbaar Vervoer voor het laatste stukje van de reis naar de bestemming. In aanvulling daarop werden automobilisten gestimuleerd door de bezettingsgraad in de auto te vergroten (carpoolen) en werden flexibele werktijden geïntroduceerd (verspreiden van de drukte over de dag).

Inmiddels is deze tweede poging ook als mislukt te beschouwen: carpoolen gebeurt sporadisch, transferia staan het merendeel van de tijd leeg, en de files zijn over een breder tijdsvak uitgespreid. Vanuit de overheid en politieke partijen wordt er weer aan gedacht om de infrastructuur uit te breiden, door middel van wegverbreding en de aanleg van dubbeldekswegen.

Ondanks de pogingen tot modal shift door de overheid blijkt dat de huidige openbaarvervoerdiensten en de auto geen alternatieven van elkaar zijn. Zo hebben experimenten in Hasselt (België) laten zien dat gratis openbaarvervoerdiensten niet leidt tot een vermindering van het autogebruik. Wel is het gebruik van de openbaarvervoerdiensten sterk toegenomen. In de meest ideale scenario's leidt een verdubbeling van de hoeveelheid reizigerskilometers via de openbaarvervoerdiensten slechts tot een reductie van twintig procent in de reizigerskilometers met de auto [Adviesdienst Verkeer en Vervoer, 2000; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2001].

3.4.6 De trend naar de toekomst

Als de verschillende trends nu samengenomen worden ontstaat een trend naar de toekomst voor het regime. In de afgelopen jaren is er een dalende tendens te zien in het aandeel dat de openbaarvervoerdiensten in het personenvervoer leveren en een daling in het aantal huishoudens dat afhankelijk is van alleen de openbaarvervoerdiensten. De trend die steeds dominanter lijkt te worden is dat mensen van deur tot deur willen reizen wat mogelijk is geworden door het steeds betaalbaarder worden van de auto. De verwachting van de

⁵In Londen vormden de openbaarvervoersdiensten al de belangrijkste vervoersmodaliteit, maar door de congestion charge is dit verder toegenomen

overheid voor de toekomst is dat mensen steeds mobieler blijven worden. Deze mobiliteit wordt bij het afnemende aandeel openbaarvervoerdiensten alleen bereikt door een toename in het wagenpark.

Binnen de huishoudens is de trend ontstaan om twee auto's in bezit te hebben: een zwaardere model met dieselmotor en een groot scala aan accessoires en een tweede, vaak kleine, auto. De autofabrikanten werken graag mee, vanuit winstoogmerk, om dit plaatje te bewerkstelligen. De huidige problemen in het personenvervoer worden alleen maar versterkt indien er niet gewerkt wordt aan langdurige oplossingsstrategieën. Het spanningsveld tussen bereikbaarheid en leefbaarheid wordt sterker. Zonder voldoende aanscherping van de normen, waarmee techniekontwikkeling gepusht wordt, wordt het milieu alleen maar zwaarder belast. Aangezien het broeikas effect nog niet aangepakt wordt kan de opwarming van de aarde zich steeds sneller gaan voortzetten.

Om Nederland leefbaar te houden voor toekomstige generaties is een trendbreuk noodzakelijk zodat de neerwaartse spiraal doorbreken wordt.

3.5 Overheden

In het personenvervoer zijn er verschillende overheden actief die de problemen willen aanpakken en trends willen stimuleren of ontmoedigen, te weten: de Europese, de nationale en lokale overheden. Voordat ingegaan wordt op concrete oplossingsstrategieën wordt eerst kort aangegeven welk werkterrein de overheden hebben met de daarbijbehorende maatregelen.

De Europese overheid stelt algemene kaders die concreet geïmplementeerd moeten worden door de verschillende lidstaten. Voor het personenvervoer richt de rol van de Europese overheid zich voornamelijk op het milieu. Momenteel worden via emissienormen voor gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende stoffen gereguleerd. In de toekomst wordt dit mogelijk uitgebreid met normen voor klimaatveranderende emissies. Naast de emissienormen subsidieert de Europese overheid diverse onderzoeken en demonstratieprojecten en worden doelstellingen voor de verschillende ontwikkelingen vastgelegd. Een voorbeeld van een doelstelling is het behalen van een brandstofaandeel van biobrandstoffen ten opzichte van de totale brandstoffenmarkt van 5,75% in 2010.

De nationale overheid is een centraal orgaan welke op landelijk niveau naar het personenvervoer kijkt. In deze rol houdt de nationale overheid zich voornamelijk bezig met het congestie- en het milieuprobleem. Er zijn een viertal type maatregelen waarover de nationale overheid beschikt:

- Financiële maatregelen bestaande uit accijnzen, belastingen, heffingen en subsidies.
- Investerings in voornamelijk de inrichting en het onderhoud van de infrastructuur.
- Het stimuleren van onderzoeken en het financieren ervan.
- Generieke sturing, zoals: de implementatie van afspraken op Europees niveau, het wel of niet verlenen van vergunningen, toelating op de weg, het verlenen van concessies voor het openbaar vervoer op provinciaal niveau, etc.

Tot slot zijn er de lokale overheden, zoals steden en gemeenten, die zorg dragen voor de bereikbaarheid en leefbaarheid in hun stad (of gemeente). De maatregelen die de lokale overheden kunnen nemen bestaan uit:

- De inrichting van de lokale infrastructuur om zo lokale verkeersstromen te beïnvloeden. Hierbij kan gedacht worden aan éénrichtingsverkeer, vrije busbanen, meer of minder parkeerplaatsen, etc.
- Lokale ge- en verboden, zoals: voetgangerzones, woonerven, etc.
- Financiële middelen zoals parkeertarieven.

Als gekeken wordt naar de verschillende maatregelen die de diverse overheden hebben, dan is er een onderscheid te maken tussen twee types: economische en directe maatregelen. Economische maatregelen bestaan uit het koppelen van gedragingen aan een prijskaartje. Zo wordt de aanschaf van een hybride gestimuleerd met een vrijstelling van de BPM of het parkeren vlakbij het centrum van een stad is duurder dan daarbuiten. De filosofie achter de economische maatregelen is dat het gedrag van reizigers beïnvloed wordt door de ongewenste vormen van gedrag hogere kosten met zich te laten meebrengen. Naast de economische maatregelen zijn er maatregelen die directe sturing in een gewenste richting uitoefenen, zoals het bevoordelen van vervoerswijzen (busbanen in steden). De filosofie achter deze maatregelen is dat economische instrumenten de hinder onvoldoende stimuleren en dat de overheid keuzes maakt over welke alternatieven beter geschikt zijn [Elzen, 2005].

3.6 Oplossingstrategieën met toekomstverwachtingen

3.6.1 Congestie

Om congestie op wegen te verminderen wordt er op vier fronten gewerkt: het optimaliseren van de bestaande infrastructuur, het uitbreiden van de bestaande infrastructuur en verbeteren van maatregelen tegen verstoringen (zoals ongelukken en wegwerkzaamheden) en het terugdringen van mobiliteit via individuele vervoermiddelen [De Verkeersinformatiedienst, 2004]. Op lange termijn wordt er gewerkt aan automatische voertuiggeleiding.

Optimaliseren van het bestaande wegennet heeft de voorkeur boven uitbreiden van de bestaande infrastructuur, omdat uitbreiden kostbaar is, de leefomgeving aantast (visueel met name) en er een gebrek aan ruimte voor uitbreiding is. Voor de optimalisatie van de infrastructuur wordt gewerkt aan dynamische oplossingen die inspelen op actuele verkeerssituaties [Van A naar Beter, 2004; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004].

Een eerste verbeterstrategie ligt in het optimaliseren van de huidige infrastructuur. Een deel van het asfalt, namelijk de vluchtstrook, wordt op dit moment niet benut. De vluchtstrook kan als extra baan ingezet worden, met behoud van de maximumsnelheid, op drukke momenten (spitstrook), of permanent, maar dit vereist deels uitbreiding van de bestaande infrastructuur met uitwijkplaatsen voor kapotte voertuigen en camera's voor de controle op de veiligheid. Een andere oplossing is een (permanente) herindeling van de bestaande wegen. Zo wordt een vierbaansweg met brede banen, permanent of op drukke momenten, omgezet naar een zesbaansweg met smallere stroken. Op deze smallere stroken wordt dan met een lagere maximumsnelheid gereden moeten om de veiligheid te waarborgen [Van A naar Beter, 2004; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004]. Bij opritten van wegen wordt ook gebruik gemaakt van toeritdosering. Verder wordt gewerkt aan doelgroepstroken waarvoor de reiziger moet betalen om erover te mogen rijden [Rijkswaterstaat, 2004].

Een tweede strategie is het optimaliseren van het reisgedrag van de reiziger door betere informatievoorziening. Doel is om de reiziger van actuele informatie te voorzien zodat hij / zij de snelste in plaats van de kortste route neemt. Dit wordt bereikt door informatieborden boven de weg te plaatsen, die de actuele verkeerssituatie weergeven en de reiziger adviseren over alternatieve routes. Met behulp van advisering is het mogelijk om reizigers rondom knelpunten te laten rijden [Van A naar Beter, 2004; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004]. De nieuwe generaties routeplanners, zoals Tomtom en Route 66, plannen niet meer de kortste route naar de bestemming, maar de snelste route, waarbij rekening gehouden wordt met actuele verkeerssituaties.

Op sommige plekken is het niet mogelijk om het gebruik van de infrastructuur te intensiveren, dus daar wordt gekeken of de infrastructuur uitgebreid moet worden of onveranderd kan blijven. Momenteel wordt er niet alleen meer gedacht aan infrastructuur die op het bestaande landschap ligt, maar ook infrastructuur onder het landschap en boven de bestaande infrastructuur [Van A naar Beter, 2004; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004].



Figuur 3.9: Voorbeeld van een ongeplande verstoring [De Verkeersinformatiedienst, 2004]

Om verstoringen van de doorstroming te verminderen moeten geplande verstoringen (zoals wegwerkzaamheden) zoveel mogelijk op rustige momenten plaatsvinden, bijvoorbeeld in de avond- en nachturen. En de informatievoorziening over de werkzaamheden moet zo goed mogelijk gebeuren, zodat de reiziger de plek van wegwerkzaamheden kan omzeilen. Ongeplande verstoringen, zoals ongelukken (zie figuur 3.9), moeten zo snel mogelijk opgemerkt en verholpen worden. Dit wordt gedaan door betere monitoring van de wegen en een snellere incident management bij ongeplande verstoringen [De Verkeersinformatiedienst, 2004].

Tot slot wordt er gewerkt aan het reduceren van het aantal vervoermiddelen op de weg door stimulatie van alternatieve vervoerswijzen. Zo wordt het openbaar vervoer gestimuleerd eventueel in combinatie met het huren van vervoermiddelen voor het laatste stukje naar de bestemming. Andere alternatieven zijn: carpoolen, telewerken, flexibele

werktijden, reductie van werkuren [Van A naar Beter, 2004; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004]. De afgelopen jaren heeft de overheid dit beleid proberen vorm te geven, maar hier is op minimale schaal resultaat geboekt.

Op nicheniveau zijn nog een tweetal ontwikkelingen gaande die een bijdrage leveren aan het verminderen van de congestie. Allereerst is er het concept van rekeningrijden waarbij de wegenbelasting wordt gekoppeld aan het weggebruik door een reiziger. In dit concept is er ruimte om verschillende tarieven in te voeren afhankelijk van de plaats en het tijdstip van reizen. Daarnaast wordt er al lange tijd gewerkt aan automatische voertuiggeleiding. Met dit systeem wordt de onregelmatigheden in rijsnelheden van voertuigen op de weg weggenomen waardoor de doorstroming verbeterd. Beide ontwikkelingen worden verder uitgewerkt in hoofdstuk 5.

3.6.2 Bereikbaarheid en Leefbaarheid

Om de kwaliteit van de leefomgeving te verbeteren, zonder dat dit ten kostte gaat van de bereikbaarheid, worden verschillende oplossingsstrategieën gebruikt. Allereerst wordt de kwaliteit in de woongebieden verbeterd, door het verlagen van de maximumsnelheid naar 30 km/uur (bevorderen veiligheid en verminderen geluidsoverlast). De infrastructuur kan beter in harmonie gebracht worden met de omgeving waar deze is gelegen ter bevordering van het visuele aspect. Binnen in steden worden autovrije en autoluwe zones gecreëerd om: de reiziger uit de auto te krijgen, de veiligheid van het winkelende publiek en toeristen te vergroten en geluidsoverlast te verminderen [Van A naar Beter, 2004]. In Londen wordt er gewerkt met een “congestion charge” waarbij een modal shift van reizigers naar openbaarvervoerdiensten wordt bevordert (zie 5.1.2)

Technologische ontwikkelingen van de transportmiddelen verbeteren ook de leefbaarheid. Zo produceert een elektromotor minder geluid in vergelijking met de verbrandingsmotor. Door een combinatie van andere banden, met bijvoorbeeld asymmetrisch profiel, en wegdek, bijvoorbeeld ZOAB, is het mogelijk om een lagere geluidsproductie tijdens de beweging te krijgen [De Ingenieur, 2004a; Van A naar Beter, 2004; RIVM, 2004a].

3.6.3 Milieu

Luchtvervuilende en gezondheidsbedreigende emissies

Door middel van normering wordt vanaf Europees niveau gereguleerd dat de luchtvervuilende en gezondheidsbedreigende emissies langzaamaan verminderd worden. Door deze normering worden de autofabrikanten gedwongen om de auto langzaamaan steeds schoner te laten worden (zie ook 3.4.3). Om de auto steeds schoner te laten worden zijn er verschillende oplossingen beschikbaar die kort besproken worden.

Optimalisatie bestaat uit oplossingen die de prestaties van de voertuigen verbeteren zonder al te veel te veranderen aan het bestaande concept. Hierbij kan gedacht worden aan de toevoeging van een roetfilter aan dieselauto's om zo de uitstoot van de dieselauto te verminderen. De startstopmotor van Volkswagen zorgt ervoor dat de motor van de auto alleen draait wanneer de auto rijdt en op andere momenten uitstaat. Hierdoor wordt het brandstofverbruik van de auto verminderd en daarmee ook automatisch de belasting voor het milieu [Van A naar Beter, 2004; Elzen et al., 1996].

Alternatieve oplossingen vormen geen uitbreidingen op het bestaande concept, maar daadwerkelijke veranderingen. Hierbij kan gedacht worden aan nieuwe brandstoffen en aandrijvingen voor de auto, zoals biobrandstoffen, elektrische voertuigen en de auto met

brandstofcellen. De hybride voertuigen die op de markt zijn vormen daarbij een tussenform met een conventionele verbrandingsmotor naast bijvoorbeeld een elektromotor. Het voordeel van deze alternatieven is dat ze zodanig ontwikkeld worden dat ze meerdere emissieproblemen tegelijk aanpakken. Het nadeel is wel dat ze door het heersende regime heen moeten breken en zich nog moeten bewijzen [Elzen et al., 1996; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004; EMIS, 2004].

De rol van de Nederlandse overheid in het tegengaan van de emissies is de reiziger aanzetten tot gedragsverandering en tot de inzet van technologische maatregelen. Vanuit de overheid is een nieuwe reclamecampagne van start gegaan, onder de naam “het nieuwe rijden”. Deze campagne heeft als doel om het rijgedrag van de automobilist aan te passen zodat deze milieuvriendelijker gaat rijden. Naast de promotiecampagnes, die de reiziger bewuster moet maken van de vervoerskeuze, bezit de overheid via wegenbelasting en accijnzen middelen om de zelfbewustwording van de reiziger te benadrukken. Rekeningrijden biedt hierbij een flexibelere manier om de reiziger te sturen, doordat de kilometerheffing gekoppeld worden aan de vervuilingsgraad van het voertuig, het tijdstip van reizen, de keuze van de weg, etc. Tot slot heeft de overheid de mogelijkheid tot subsidie-regelingen waarmee het mogelijk is om oplossingen die qua kostprijs onaantrekkelijk zijn concurrerend te maken met de bestaande technologieën [RIVM, 2004a; Van A naar Beter, 2004; Mols, 2004; RIVM, 2004b].

Broeikasgasemissies

Op dit moment is er voor de broeikasgasemissies geen regelgeving vanuit de overheid. Er is wel een intentie om de emissie van broeikasgassen te verminderen, maar verder dan een overeenkomst tussen de auto-industrie en de Europese Commissie is het tot nu toe nog niet gekomen. Deze afspraak zegt dat de auto-industrie in 2008 ervoor zorgt dat over het gehele nieuwe wagenpark gekeken de CO₂-emissie per auto met 25% gereduceerd wordt (naar 140 gram per km). In 2012 wil de Europese Commissie de uitstoot nog verder teruggeschoefd hebben naar 120 gram per km. Verder is de auto-industrie verplicht om de automobilist te informeren over brandstofzuinigheid. De lidstaten van de EC mogen energiezuinige auto's promoten met behulp van subsidies [Hoed, 2004a].

Naast de overeenkomst is er een groot scala aan oplossingen beschikbaar om de broeikasgasemissies te reduceren. Er zijn oplossingen die het brandstofverbruik van de huidige auto's verminderen, de startstopmotor van volkswagen, waardoor zowel de broeikasgasemissies als de milieu- en gezondheidsbedreigende emissies verminderen. Een alternatieve oplossingen vormen nieuwe brandstoffen, zoals biobrandstoffen, en nieuwe aandrijvingstechnieken voor de auto, bijv. de brandstofcel in combinatie met de elektromotor [Elzen et al., 1996; Hoof, 2001; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004; EMIS, 2004].

Hoofdstuk 4

Waterstofniche

Waterstof wordt gezien als de ideale brandstof voor de toekomst. Hiervoor is een aantal redenen, namelijk waterstof: is het meest voorkomende atoom op aarde, heeft de grootste energiedichtheid per molecuul (twee keer zoveel als aardgas), is niet vervuילend of giftig, levert bij de verbranding geen schadelijke of vervuילende stoffen op, is het lichtste gas waardoor het snel diffundeert (wat ten goede komt van de veiligheid) en is een flexibele energiedrager.

Maar waterstof heeft ook een aantal problemen, namelijk waterstof: moet geproduceerd worden, heeft door het lage gewicht een lage energiedichtheid per volume-eenheid (zie tabel 4.1) en heeft nog geen infrastructuur beschikbaar.

Brandstof	Energiedichtheid
Waterstof (vloeibaar)	0,27
Benzine	1,00
Diesel	1,14
LPG	0,73

Tabel 4.1: Relatieve energiedichtheid per volume-eenheid waterstof ten opzichte van benzine [Nederlandse Waterstof Vereniging, 2004]

In dit hoofdstuk zal de huidige stand van ontwikkelingen voor waterstof besproken worden alsmede de verwachtingen bij diverse actoren. De dynamiek van de ontwikkelingen zal verder uitgewerkt worden in de scenario's. Er zal begonnen worden met het bekijken van de technologieketen rondom waterstoftechnologie, namelijk de productie van waterstof (4.1), de distributie en opslag daarvan (paragraaf 4.2) en de toepassingsmogelijkheden in het personenvervoer van waterstoftechnologie (paragraaf 4.3). Bij elk onderdeel van de keten zal gekeken worden naar de verschillende technologische mogelijkheden, de barrières en de verwachting van actoren met betrekking tot de mogelijkheden en het wegwerken van de barrières.

Vervolgens zal gekeken worden naar de veiligheid en publieke acceptatie van toepassingen met waterstof (paragrafen 4.4 en 4.5). Hierbij zal er gekeken worden in hoeverre er barrières verwacht worden door de verschillende actoren.

Tot slot van dit hoofdstuk zal er gekeken worden naar de activiteiten op het gebied van waterstoftechnologie. In paragraaf 4.6 zal daarvoor in een vogelvlucht gekeken worden naar de activiteiten in Amerika, Canada, Japan en Europa. In paragraaf 4.7 zal vervolgens gekeken worden naar het Europese demonstratieproject CUTE waarbij onder andere in Amsterdam een drietal brandstofcelbussen rondrijden met waterstof als brandstof.

4.1 Productie

Waterstof is het meest voorkomende atoom in het universum, maar op aarde is het vrijwel alleen te vinden in gebonden vorm (zoals bijvoorbeeld in water en alle organische verbindingen). Om waterstof als brandstof te kunnen gebruiken is het daarom noodzakelijk het te produceren. Waterstof is dus niet een energiebron, maar een energiedrager zoals elektriciteit [Nederlandse Waterstof Vereniging, 2004; Avadikyan et al., 2003].

De energiebronnen waaruit waterstof geproduceerd kan worden zijn divers, maar er is een onderscheid te maken naar een viertal types: fossiel, biomassa, hernieuwbaar, en nucleair. Fossiele energiebronnen (ruwe olie, kolen, aardgas, etc.) domineren de vervoerssector nu als energiebron, maar hebben als beperking dat ze niet hernieuwbaar zijn en dus op een gegeven moment niet meer beschikbaar zijn. Biomassa (struiken, gewassen, bomen, ...) zijn hernieuwbaar en leiden tot een klimaatneutrale brandstofvoorziening. Hernieuwbare bronnen (zon, wind, water en thermisch) worden als duurzaam beschouwd, omdat ze naast hernieuwbaar tot een nulmissie personenvervoer leiden. Tot slot komen de nucleaire energiebronnen weer onder de aandacht vanwege de verwachting dat aan de toekomstige energievoorziening niet alleen kan worden voldaan met hernieuwbare en biomassa energiebronnen (ervan uitgaande dat fossiele brandstoffen nauwelijks tot niet meer beschikbaar zijn). Onbekend van de nucleaire bronnen is in welke mate deze als duurzaam te beschouwen zijn [Avadikyan et al., 2003; Hoed, 2004a].

Om uit deze energiebronnen waterstof te produceren zijn er momenteel een aantal productiemethoden beschikbaar welke kort besproken worden. Bij elektrolyse wordt met behulp van elektriciteit water gesplitst in waterstof en zuurstof. Dit biedt de mogelijkheid om waterstof te produceren uit met name hernieuwbare en nucleaire energiebronnen. Met deze methode is het mogelijk om met een efficiëntie van ongeveer 70 - 85% elektrische energie om te zetten in waterstof [Berg, 2004; Avadikyan et al., 2003; US Department of Energy, 2004b].

Ongeveer de helft van de totale hoeveelheid waterstof wordt momenteel uit fossiele bronnen geproduceerd, voornamelijk aardgas, door middel van 'steam reforming'. Bij dit proces reageert aardgas met stoom, onder invloed van een katalysator en bij hoge temperaturen (700 - 800 °C), waardoor syngas ontstaat, een mengsel van waterstof en koolmonoxide. De waterstof en koolmonoxide kunnen van elkaar gescheiden worden. De koolmonoxide kan vervolgens met behulp van stoom en andere chemische processen omgezet worden in waterstof en kooldioxide. Syngas kan ook geproduceerd worden door vergassing van fossiele brandstoffen als olie en kolen. Naast aardgas is steam reforming ook geschikt om vanuit biomassa waterstof te produceren [Berg, 2004; Avadikyan et al., 2003].

Tot slot zijn er nog een aantal productiemethoden in ontwikkeling waarbij gebruik gemaakt wordt van biologische processen. Zo is er onderzoek gaande naar bacteriën die (biologisch) afval kunnen verwerken en daarbij waterstof of methaan als 'afvalproduct' produceren. Een ander onderzoek dat gaande is, is het deels nabootsen van het fotosynthese proces in de natuur. Bij fotosynthese wordt water onder invloed van zonlicht gesplitst in zuurstof en waterstof om zo organisch materiaal en energie te produceren. Door een deel van dit proces na te bootsen wordt door onderzoekers van het Imperial College in Londen verwacht op grote schaal waterstof op een goedkope manier te kunnen produceren [Avadikyan et al., 2003; De Ingenieur, 2004b].

Voor een consument is het van belang om te weten hoeveel de waterstof nu uiteindelijk gaat kosten. Eind 2003 heeft brandstofproducent TOTAL aangegeven hoeveel een

consument per kg waterstof moet gaan betalen bij de pomp. Tabel 4.2 laat de productiekosten van waterstof zien afhankelijk van de gebruikte energiebron. Verder is te zien hoe de productieprijs van waterstof zich gaat ontwikkelen volgens het Amerikaanse ministerie van Energie. Deze prijsontwikkeling is mogelijk door verbetering van de bestaande productiemethoden. In figuur 4.1 is te zien hoe deze kilogram prijs afhankelijk is van de distributiemethode en het aantal klanten voor de desbetreffende pomp. Vanaf 500 klanten per dag is het voor TOTAL rendabel om een tankstation neer te zetten, wat voor de eindgebruiker betekent een prijs van maximaal 5 euro per kg waterstof. Een verder toename van het aantal klanten kan leiden tot een prijs van onder de 2 euro per kg waterstof [Schultz, 2003; US Department of Energy, 2003, 2004b]. Als de pompprijs van waterstof vergeleken worden met andere brandstoffen (zie tabel 4.3) dan is te zien dat waterstof een relatief goedkope brandstof is voor in personenauto's. Alleen de zuinigste diesels (momenteel de Audi A2 en de Volkswagen Lupo) zijn goedkoper in brandstofkosten [Ministerie van VROM, 2005].

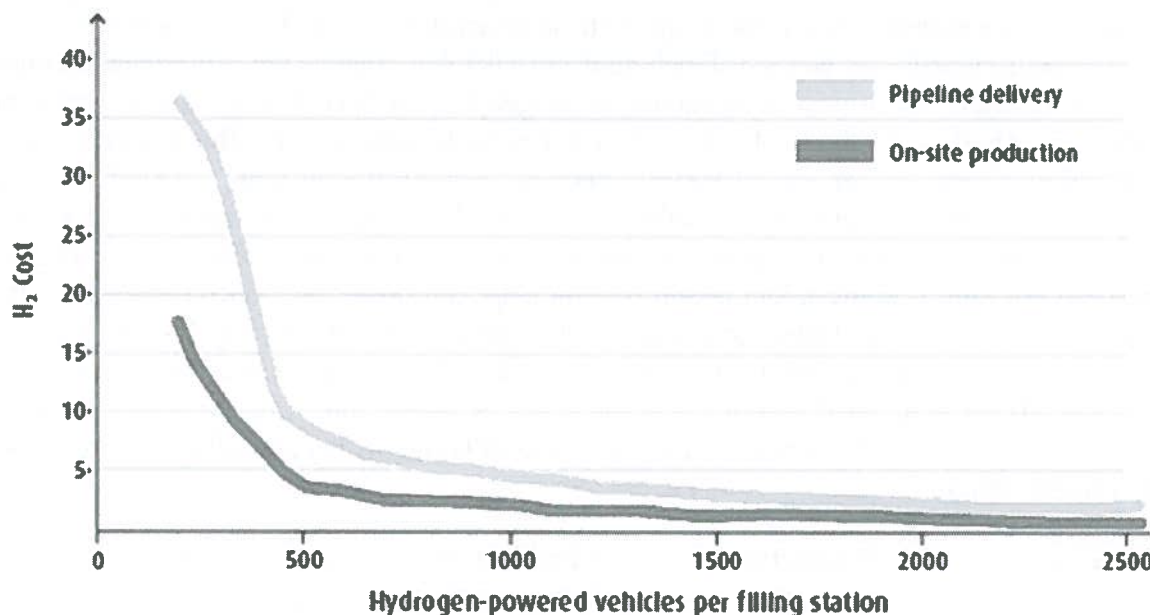
Energiebron	Productie methode	Productiekosten (nu)	Productiekosten (prognose)
Aardgas	Steam Reforming	\$ 0,75/kg	\$ 0,56/kg vanaf 2013
Kolen	Steam Reforming	\$ 0,92/kg	\$ 0,54/kg vanaf 2015+
Biomassa	Steam Reforming	\$ 3,6/kg	\$ 2,60/kg vanaf 2015+
Nucleair	Kernfusie	-	\$ 1,31/kg vanaf 2020+
Zon, zee, wind	Elektrolyse	\$ 2,60/kg	\$ 2,00/kg vanaf 2010

Tabel 4.2: Overzicht van productiekosten voor waterstof onderverdeeld naar energiebron. Prognose voor de ontwikkeling van de energiekosten door het Amerikaanse ministerie van energie is ook aangegeven [US Department of Energy, 2003, 2004b]

Brandstof	Brandstofprijs	Brandstofverbruik	Prijs per tank (600km)
Benzine	€1,25 per liter	1 liter : 12 km	€62,50
Benzine	€1,25 per liter	1 liter : 23 km	€32,60
Diesel	€0,90 per liter	1 liter : 18 km	€30,00
Diesel	€0,90 per liter	1 liter : 33 km	€16,40
Waterstof	€5,00 per kg	1 kg : 120 km	€25,00

Tabel 4.3: Berekening van de brandstofkosten voor een auto met gemiddelde tankinhoud (goed voor 600km). Voor benzine en diesel is het gemiddelde brandstofverbruik aangegeven, maar ook het brandstofverbruik van de zuinigste uitvoeringen [Ministerie van VROM, 2005; Berg, 2004]

Als gekeken wordt naar de toekomstige waterstofproductie, dan is het de bedoeling om de waterstoftechnologieketen zo duurzaam mogelijk te maken. Dit betekent dat op de lange termijn duurzame energiebronnen, hernieuwbare bronnen en biomassa, geraadpleegd zullen gaan worden voor de waterstofproductie. Op korte termijn wordt, wegens gebrek aan duurzame bronnen, de productie van waterstof ondersteund met behulp van fossiele bronnen, waarbij met name gebruik gemaakt wordt van steam reforming van aardgas. De rol die nucleaire bronnen gaan spelen in de toekomst is nog onduidelijk evenals de duurzaamheidsaspecten daarvan. Als met behulp van duurzame bronnen niet aan de energievraag kan worden voldaan, en er onvoldoende fossiele brandstoffen zijn, dan lijkt



Figuur 4.1: Kosten voor een kilogram waterstof uitgezet tegen de hoeveelheid klanten voor een tankstation van TOTAL [Schultz, 2003]

het onvermijdelijk dat nucleaire bronnen geraadpleegd zullen gaan worden [Avadikyan et al., 2003; Mallant, 2004; Hoed, 2004a].

4.2 Opslag en distributie

Voor de distributie en opslag van waterstof zijn er vier mogelijke toestanden waarin waterstof zich kan bevinden: gasvormig, vloeibaar, vast en opgeslagen in een andere stof. Voor opslag in de personenauto is het wenselijk dat de actieradius met de opgeslagen waterstof minimaal gelijk is aan de huidige voertuigen. Gemiddeld rijden de huidige personenauto's op een volle tank brandstof 600 km wat overeenkomt qua energiehoeveelheid met 5 kg waterstof. Voor grotere voertuigen als bussen speelt de eis aan actieradius ook, maar bij die voertuigen is meer ruimte beschikbaar voor grotere opslagtanks [Avadikyan et al., 2003; Berg, 2004].

Opslag van waterstof als vloeistof of vaste stof heeft als voordeel dat de energiedichtheid per volume-eenheid sterk toeneemt. Als vaste stof heeft waterstof zelfs een grotere energiedichtheid per kilogram dan de huidige fossiele brandstoffen. Het nadeel is alleen dat waterstof pas bij -253 °C vloeibaar wordt. Voor toepassingen in een autotank betekent dit dat er zeer goede isolatie en veel energie voor het koel houden van de waterstof nodig is. Hiermee lijkt het opslaan van waterstof als vloeistof of vaste stof niet geschikt voor toepassingen in het personenvervoer [Avadikyan et al., 2003; Berg, 2004].

Een alternatieve methode is de opslag van waterstof in een andere vaste stof. Eisen aan deze stoffen zijn dat het zonder al te veel moeite (energie) mogelijk moet zijn om waterstof toe te voegen aan de stof en het er vervolgens weer uit te krijgen. Vanuit een samenwerkingsverband tussen o.a. Shell en de Duitse Gesellschaft für Elektrometallurgie wordt gezocht naar een metaallegering waar zoveel mogelijk waterstof in opgeslagen kan worden, maar waar ook snel en zonder veel energie de waterstof weer uit vrij gemaakt

kan worden. Momenteel is de meest gebruikte legering ijzervanadium, waarin maximaal twee gewichtsprocenten waterstof op te slaan is. Dit betekent dat voor 5 kg waterstof een tankgewicht van 250 kg ontstaat, maar een groter nadeel is dat de tanks tijdens het rijden tot 300 °C opgewarmd moeten worden waarvoor energie gegenereerd moet worden door de motor (en dus waterstof verbrand moet worden). Om het tankgewicht te verminderen wordt er gezocht naar metaallegeringen met daarin lichtgewicht metalen, zoals magnesium en aluminium [Avadikyan et al., 2003; Berg, 2004; Wassink, 2004]. In Delft wordt bij het bedrijf Chem Tech onderzoek verricht naar gashydraten, de mogelijkheid om gas op te slaan in ijs. IJs kan maximaal 5 procent van zijn gewicht aan gas opslaan. Dit betekent dat voor de opslag van vijf kg waterstof een tankgewicht van 100 kg ontstaat. Hoewel ijs ook gekoeld en gehouden moet worden vergt dit veel minder energie dan wanneer de waterstof afgekoeld, tot vloeibare of vaste stof, en gehouden moet worden [Keulemans, 2004; Wassink, 2004]. Een ander ontwikkeling is de opslag van waterstof in nanotubes van bijvoorbeeld koolstof. Waterstof wordt dan in een buizenstructuur opgeslagen waarmee het mogelijk is tot 65% van het gewicht van de nanotubes aan waterstof op te slaan. Deze technologie is nu nog volop in ontwikkeling en vormt daardoor pas op de lange termijn een alternatieve opslagmethode [Hoed, 2004a].

Tot slot is er de mogelijkheid om waterstof onder druk op te slaan in een tank. In Amsterdam bij het CUTE-demonstratieproject wordt zo in de bussen waterstof onder een druk van 350 bar opgeslagen. Bij 350 bar heeft 5 kg waterstof ongeveer een tankinhoud van 200 liter nodig¹, welke niet op een conventionele manier in een normale personenauto past, maar in een SUV zou een dergelijke tank wel te plaatsen zijn. Het is mogelijk om waterstof onder nog grotere druk te brengen (700 bar of zelfs nog hoger), waarmee de benodigde tankinhoud ongeveer vergelijkbaar kan worden met de huidige brandstoftanks. Het nadeel van het onder druk brengen van gas is dat de kans op explosies toeneemt en dat er dus rekening gehouden moet worden met de veiligheidsaspecten. Vanuit technisch oogpunt is het mogelijk om waterstof veilig op te slaan in tanks waarbij rekening gehouden wordt met extreme omstandigheden die een brandstoftank moet kunnen doorstaan. Uiteindelijk geeft de overheid de doorslaggevende beslissing op het gebied van veiligheid door middel van regelgeving, waarna pas duidelijk wordt onder welke druk waterstof opgeslagen kan en mag worden in commerciële personenauto's [Avadikyan et al., 2003; Berg, 2004; Wit, 2004].

De distributie van waterstof bij tankstations is afhankelijk van de plaats waar de waterstofproductie plaatsvindt, namelijk on-site (decentraal) of centraal. Bij on-site productie wordt vlakbij het tankstation de waterstof geproduceerd is er een groot aantal kleine centrales waardoor de distributie over zeer kleine afstanden zal plaatsvinden (waarschijnlijk via pijpleidingen). Bij centrale productie zijn er een klein aantal grote centrales die de waterstof produceren waarvandaan de verschillende tankstations bevoorraadt worden. Deze bevoorrading kan op een vergelijkbare manier gebeuren als met de huidige fossiele brandstoffen, met behulp van grote tankvrachtwagens. In de praktijk is dit alleen niet efficiënt doordat er relatief kleine hoeveelheden waterstof getransporteerd worden waardoor er veel vrachtwagens nodig zijn om het tankstations te bevoorraden. Als alternatief wordt daarom gekeken naar transport via pijpleidingen, wat vergelijkbaar is met het huidige aardgasnetwerk [Avadikyan et al., 2003; Hoed, 2004a; Wit, 2004; Sperling and Cannon, 2004].

Als er gekeken wordt naar de toekomstige opslag en distributie van waterstof, dan is

¹in vergelijking heeft een huidige auto een tankinhoud van gemiddeld 45 liter

het momenteel het meest waarschijnlijk dat op korte termijn de opslag waterstof via onder druk opgeslagen waterstofgas zal plaatsvinden. Op de lange termijn zou dit nog kunnen veranderen afhankelijk van de ontwikkelingen op het gebied van de opslagtechnologieën en dan met name in de richting van het opslaan van waterstof in andere vaste stoffen. Op de lange termijn met pijpleidingen gewerkt zal gaan worden die naast het personenvervoer de huishoudens ook voorzien. Op de korte termijn zal eerder on-site productie plaats gaan vinden, omdat de afzetmarkt te klein is om direct te beginnen met een grootschalige introductie van pijpleidingen [Mallant, 2004; Wit, 2004; Avadikyan et al., 2003].

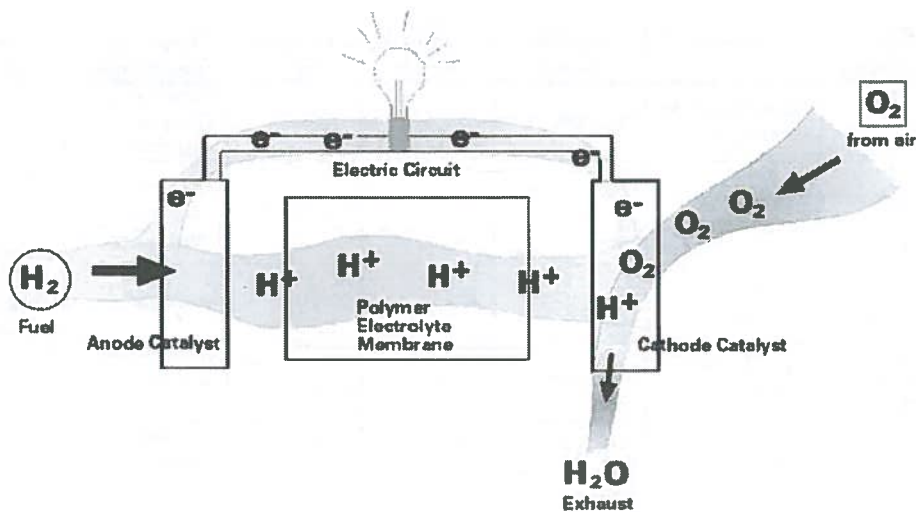
4.3 Toepassingsmogelijkheden in het personenvervoer

Voor de omzetting van de in waterstof opgeslagen energie naar bruikbare energie voor in de auto zijn er twee mogelijkheden, namelijk de verbrandingsmotor en de brandstofcel. Beide technieken zullen kort besproken worden in deze paragraaf.

De verbrandingsmotor is de huidige methode om een fossiele brandstof om te zetten in een mechanische beweging. Door het tot ontbranding brengen van een onder druk gebrachte mengsel van brandstof en lucht ontstaat een mechanische beweging waarmee een voertuig aangedreven wordt. Een dynamo wordt gebruikt om elektrische energie op te wekken, die eventueel opgeslagen kan worden in een accu, benodigd voor de verschillende accessoires in het voertuig (bijvoorbeeld een radio). Voor het optimaal gebruik van waterstof als brandstof in combinatie met een verbrandingsmotor moet de verbrandingsmotor aangepast worden aan de specifieke eigenschappen van waterstof Avadikyan. Momenteel zijn enkele autofabrikanten, bijvoorbeeld BMW, bezig met de ontwikkeling van een verbrandingsmotor voor waterstof. De andere autofabrikanten kiezen voor de brandstofceltechnologie [Avadikyan et al., 2003; Hoed, 2004a; Mallant, 2004].

In 1839 ontdekte de Brit Sir William Grove dat bij het samenvoegen van waterstof en zuurstof, elektriciteit en water ontstaat. Deze elektrochemische reactie vormt het basisprincipe voor de brandstofcel (zie figuur 4.2). Na de ontdekking door Sir William duurde het tot 1932 voor Francis Bacon de eerste brandstofcel ontwikkelde bestaande uit een alkaline elektrolyt en nikkel elektrodes. Dit type brandstofcel werd voor het eerst in 1960 toegepast in de Gemini ruimtecapsules en daarna in het Apollo ruimtevaartprogramma van NASA [Avadikyan et al., 2003; Fuel Cells, 2004; Hoed, 2004a].

Inmiddels zijn er een aantal types brandstofcel te onderscheiden met verschillende eigenschappen en toepassingen (zie tabel 4.4). Voor toepassingen in het personenvervoer geniet de PEMFC bij de meeste fabrikanten de voorkeur. Vanwege de lage werkingstemperatuur van de PEMFC is het mogelijk om de auto sneller te laten starten (kortere opwarmtijd voor de brandstofcel nodig). Andere overwegingen die een PEMFC aantrekkelijk maken voor het personenvervoer is de compactheid (laag gewicht per kW) en door de aanwezigheid van een vaste stof elektrolyt die langer meegaat dan een vloeibare elektrolyt. Dit komt doordat vloeibare elektrolyten corrosie in de brandstofcel bevorderen [Avadikyan et al., 2003; Fuel Cells, 2004; Hoed, 2004a]. Naast de PEMFC zijn nog twee andere types brandstofcellen geschikt voor het personenvervoer. De AFC is eenvoudig te produceren, wat kosten technisch aantrekkelijk is, maar kampt met een tweetal beperkingen. Ten eerste is de kaliumhydroxide oplossing sterk corrosie bevorderend, wat ten koste gaat van de levensduur van de brandstofcel. En in de tweede plaats mag in de aangevoerde zuurstof geen kooldioxide aanwezig zijn. Dit betekent dat aan de kathode kant van de brandstofcel geen normale lucht aangeboden kan worden. Ondanks deze problemen wordt er nog onderzoek gedaan naar het verbeteren van de AFC [Avadikyan



Figuur 4.2: De negatieve elektrode (anode) en de positieve elektrode (kathode) van de brandstofcel worden via de elektrolyt (of proton uitwissel membraam) en een elektriciteitsdraad met elkaar verbonden. Aan de kant van de anode wordt waterstof (H_2) toegevoegd aan de brandstofcel, en aan de kant van de kathode zuurstof (O_2). Door aanwezigheid van een katalysator aan de zijde van de anode splits waterstof zich in protonen (H^+) en elektronen (e^-). De protonen verplaatsen zich via de elektrolyt naar de zijde van de kathode. De elektronen verplaatsen zich via de elektriciteitsdraad, waardoor elektriciteit ontstaat voor aandrijving van de auto. Aan de zijde van de kathode reageren, onder invloed van een katalysator, de protonen, elektronen en zuurstof met elkaar waardoor water en warmte ontstaat [Fuel Cells, 2004; Avadikyan et al., 2003; Hoed, 2004a]

et al., 2003; Fuel Cells, 2004; Hoed, 2004a]. Het tweede type brandstofcel dat geschikt is voor het personenvervoer is de SOFC. De PEM heeft als nadeel dat het merendeel van de energie opgeslagen in de waterstof (55 - 65%) omgezet wordt in warmte. Deze warmte kan alleen in kleine mate gebruikt worden om de brandstofcel op temperatuur te houden en het merendeel zal de auto ongebruikt verlaten. De SOFC heeft hoge temperaturen nodig om te functioneren, waardoor het mogelijk is om de energie die omgezet wordt in warmte hergebruikt kan worden om de brandstofcel op temperatuur te houden. Als dit hergebruik van de warme lucht meegenomen wordt kan de efficiëntie van de brandstofcel toenemen tot ongeveer tachtig procent. Nadeel van de SOFC voor transport is dat het starten van de auto ten opzichte van de PEMFC veel tijd in beslag neemt [Avadikyan et al., 2003; Fuel Cells, 2004; Hoed, 2004a].

In het personenvervoer biedt de brandstofcel een aantal voordelen. Allereerst kan aan de emissiekant van voertuigen winst geboekt worden, op zowel klimaatbeïnvloedende emissies als luchtvervuilende en gezondheidsbedreigende emissies doordat uit de uitlaat van een voertuig alleen water komt. Verder wordt de geluidsproductie van een voertuig drastisch gereduceerd indien de brandstofcel gecombineerd wordt met een elektromotor. De geluidsproductie van een voertuig dat overblijft bestaat dan voornamelijk nog uit het contact tussen de banden en het asfalt. Ten derde levert de brandstofcel elektrische energie waardoor het mogelijk is om te voldoen aan de toenemende vraag naar elektriciteit in voertuigen voor de accessoires. Ten vierde gaat een brandstofcel bijna twee keer zo efficiënt met zijn brandstof om in vergelijking met de verbrandingsmotor. Door een combinatie van een brandstofcel met een elektromotor is de efficiëntie van een voertuig, in vergelijking met een soortgelijk voertuig met verbrandingsmotor een factor anderhalf

Type Brandstofcel	Elektrolyt	Temperatuur Bereik	Elektrische efficiëntie ¹	Vermogens-bereik	Toepassings-mogelijkheden	Onderzoeks-activiteiten
Alkaline (AFC)	Kaliumhydroxide (vloeibaar)	60- 200°C	35 - 55%	< 100 kW	Ruimtevaart, Transport, Draagbaar	Weinig
Proton Exchange Membrane (PEMFC)	Polymeer (vaste stof)	50- 100°C	35 - 45%	5 - 250 kW	Transport, Draagbaar, Stationair	Sinds 1985 hoog, prototype stadium
Phosphoric Acid (PAFC)	Fosforzuur (vloeibaar)	150- 200°C	40%	200kW	Stationair	Weinig, commercieel beschikbaar
Molten Carbonate (MCFC)	Gesmolten zouten (vloeibaar)	600- 700°C	>50%	2kW tot MW bereik	Stationair	Hoog, prototype stadium
Solide Oxide (SOFC)	Polymeer (vaste stof)	900-1000°C	>50%	<5kW	Transport, Stationair	Zeer hoog

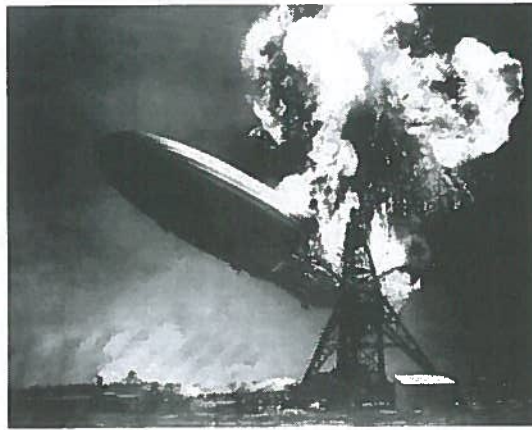
Tabel 4.4: Overzicht van types brandstofcellen met belangrijkste eigenschappen [Avadikyan et al., 2003; Hoed, 2004a; Fuel Cells, 2004]

groter. In de toekomst is de verwachting dat de efficiëntie van een brandstofcelvoertuig nog sterker kan toenemen in vergelijking met een verbrandingsmotorvoertuig (meer dan twee keer zo efficiënt), doordat de brandstofceltechnologie nog relatief nieuw is en dus nog veel ontwikkeling- en optimaliseringsruimte biedt [Wit, 2004; Avadikyan et al., 2003; Hoed, 2004a; US Department of Energy, 2004c].

Een groot nadeel van de brandstofcel momenteel is de kostprijs van een brandstofcel. Elke brandstofcel wordt momenteel met de hand gemaakt in laboratoria door gespecialiseerde wetenschappers. Het gevolg hiervan is dat de kostprijs van een enkele brandstofcel een factor tien hoger liggen dan een gewone verbrandingsmotor. De verwachting is dat de hoge kostprijs drastisch gereduceerd kan worden als de productie van een brandstofcel geautomatiseerd wordt. Een tweede nadeel van brandstofceltechnologie is dat nog te weinig bekend is over de prestaties van een brandstofcelvoertuig onder diverse omstandigheden en de levensduur van een brandstofcelvoertuig. Voor een brandstofcel is het in elk geval van belang dat deze gevoed wordt met zuivere waterstof, omdat anders de brandstofcel vervuild raakt en daardoor minder goed zal gaan functioneren [Wit, 2004; Avadikyan et al., 2003; Hoed, 2004a; US Department of Energy, 2004c].

4.4 Veiligheid

In 1937 gebeurde er een ramp met de zeppelin Hindenburg waardoor 37 mensen de dood vonden. De zeppelin werd zwevende gehouden met behulp van waterstof en aanvankelijk als oorzaak aangewezen van de ramp. Onderzoek door waterstofexpert Adison Bain, werkzaam bij de NASA, heeft het tegendeel bewezen. De belangrijkste oorzaak voor de ramp werd gevormd door een hoofdbestanddeel van de verf waarmee de zeppelin bedekt is. Dit bestanddeel wordt tegenwoordig als één van de bestanddelen in raketbrandstof gebruikt, en heeft door een elektrische ontlading bij het landen in vlam zijn gevlogen. De waterstof heeft in latere instantie vlam gevat [Hydrogen Now, 2004]. Door deze ramp heeft waterstof een slechte naam gekregen op het gebied van veiligheid in de afgelopen jaren. In de praktijk is waterstof niet veiliger, of minder gevaarlijk, dan een willekeurige andere brandstof. De enige voorwaarde is dat rekening gehouden moet worden met de specifieke eigenschappen van waterstof in het ontwerp en gebruik van waterstof. In deze paragraaf zullen vijf eigenschappen van waterstof besproken worden [National Hydrogen



Figuur 4.3: Foto van de ramp met de Hindenburg [National Hydrogen Association, 2004]

Association, 2004].

Doordat waterstof lichter is dan lucht kan het zich gemakkelijk verspreiden in lucht (het is bijna vier keer zo vluchtig als aardgas). Bij het vrijkomen van waterstof zal een gevaarlijke concentratie zich snel verspreiden tot een minder gevaarlijke concentratie. Door het lage gewicht zal de richting van verspreiding zich voornamelijk weg van de aardbodem plaatsvinden. In een ontwerp kan van deze eigenschap gebruik gemaakt worden, door te zorgen dat ontsnapte waterstof zich snel kan verspreiden weg van gebruikers van de toepassing [National Hydrogen Association, 2004; Hydrogen Now, 2004].

Waterstof is, net als aardgas, geur-, kleur- en smaakloos waardoor het niet mogelijk is om het te detecteren met de menselijke zintuigen. Toevoeging van geurstoffen, zoals bij aardgas, is nog niet mogelijk bij toepassingen met brandstofcellen, doordat deze vervuild raken en slechter gaan functioneren. In de industrie wordt daarom al tientallen jaren gebruik gemaakt van waterstofsensoren die waarschuwen bij lekkages in de waterstofopslagtanks [National Hydrogen Association, 2004].

Waterstof is in een groot concentratiebereik ontvlambaar (4 - 74%) of zelfs explosief (18 - 59%). Om te kunnen ontvlammen moet er een bepaalde hoeveelheid energie toegevoegd worden aan de waterstof. Tot concentraties van tien procent waterstof is de benodigde energie groter dan om bijvoorbeeld benzine te laten ontvlammen. Een concentratie van 29% waterstof in lucht is het gevaarlijkst doordat dan een minimale hoeveelheid energie (0,02 mJ) toegevoegd hoeft te worden (een tiende ten opzichte van benzine). Door de vluchtigheid van waterstof is het moeilijk om hoge concentraties te bereiken die explosief zijn. Verder zal de waterstof zich weg van de aardbodem bewegen waardoor indien er een explosie plaatsvindt deze zich op grotere hoogte zal bevinden. Zelfontbranding van waterstof vindt plaats vanaf 550 °C. In vergelijking kan gekeken worden naar benzinedampen die al vanaf een concentratie van één procent een explosief karakter heeft, laag bij de grond blijven hangen (doordat benzinedamp zwaarder is dan lucht) en een zelfontbrandingstemperatuur heeft vanaf 228 °C [National Hydrogen Association, 2004; Hydrogen Now, 2004].

De vlam die ontstaat bij verbranding van waterstof straalt minder warmte uit in vergelijking met koolwaterstoffen. Oorzaak hiervan is dat er geen koolwaterstoffen aanwezig zijn en dat bij de verbranding van waterstof een hitte absorberende vloeistof ontstaat, namelijk water. De waterstofvlam zelf blijft even heet als andere vlammen, maar beschadigt de omgeving van de waterstofbrandhaard minder (waardoor de brand zich minder snel zal verspreiden). Een waterstofbrand zal door de hoge vluchtigheid van kortere duur zijn

in vergelijking met een benzinebrand [National Hydrogen Association, 2004; Hydrogen Now, 2004]. Waterstof is voor of na verbranding niet gezondheidsbedreigend of luchtvervuilend. Door de vluchtigheid van waterstof zal deze ook geen aanleiding kunnen vormen tot verstikking (zoals aardgas dat wel zou kunnen). Bij verbranding levert waterstof op de lange termijn ook geen schadelijke effecten aan het klimaat, tenzij de waterstof niet klimaatvriendelijk geproduceerd wordt [National Hydrogen Association, 2004].

Waterstof heeft andere eigenschappen dan de huidige fossiele brandstoffen, maar als rekening gehouden wordt met deze eigenschappen dan kan waterstof in toepassingen even veilig zijn als de huidige brandstoffen. Volgens Hoekloos nu al mogelijk om waterstof op een technisch veilige en gecontroleerde manier toe te passen in het personenvervoer (bijvoorbeeld het CUTE demonstratieproject in Amsterdam). Maar technisch veilig is niet voldoende, de eindgebruiker zal goed geïnformeerd en geïnstrueerd moeten worden zodat de voertuigen ook veilig gebruikt worden. Verder zal vanuit de overheid door middel van regelgeving aangegeven moeten worden, wanneer een brandstofcelvoertuig veilig genoeg is voor de commercie [Wit, 2004; Schultz, 2003].

4.5 Publieke Acceptatie

Vanuit de industrie lijkt het beeld te zijn dat waterstoftechnologie de huidige fossiele brandstoffen in het personenvervoer gaat vervangen, maar deze transitie kan niet plaatsvinden zonder een publieke acceptatie van de technologie. Vanuit de TU Delft is onderzoek gedaan naar de publieke acceptatie van waterstof binnen Nederland. Uit dat onderzoek volgt dat een transitie naar waterstoftechnologie nog niet bedreigd wordt door een publieke weigering, maar het publiek is gevoelig voor negatief gekleurde informatie uit de media (zoals de ramp met de Hindenburg). Om dit te voorkomen wordt door de onderzoekers van de TU Delft geadviseerd om objectieve informatie over waterstof te verspreiden en te benadrukken welke voordelen waterstoftechnologie biedt voor de burger [Bosch et al., 2004]. Waterstoftechnologie zal zich in elk geval, net zoals elk nieuw modern product, aan de consument moeten bewijzen op het gebied van veiligheid en betrouwbaarheid [US Department of Energy, 2004c].

4.6 Onderzoeks- en demonstratieprojecten

In deze paragraaf zal besproken worden welke onderzoeks- en demonstratieactiviteiten plaatsvinden op het gebied van waterstoftechnologie in Amerika, Canada, Japan en Europa. Belangrijk deel van de paragraaf is gericht op de ontwikkelingen in Amerika, omdat daarover de meeste literatuur beschikbaar is.

4.6.1 Amerika

In Amerika lopen verschillende onderzoeksprogramma's naast elkaar op het gebied van waterstoftechnologie. In 1993 begon het met het onderzoeksprogramma Partnership for a New Generation of Vehicles. Dit onderzoeksprogramma liep van 1993 tot en met 2002 en vormde de bezegeling van een afspraak tussen de Amerikaanse overheid en de "Big Three" van de Amerikaanse auto-industrie (General Motors, Ford en Chrysler²). Het PNGV had drie doelen voor ogen. Allereerst het verbeteren van de concurrentiepositie van de

²Tegenwoordig DaimlerChrysler

Amerikaanse auto-industrie ten opzichte van andere landen door het optimaliseren van productiemethoden. Ten tweede het verbeteren van de bestaande transportmiddelen op het gebied van brandstofefficiëntie en emissies. En ten derde de haalbaarheid onderzoeken, met behulp van prototypes, van alternatieve voertuigen met een brandstofefficiëntie van 50 km per liter brandstof en een bereik van ongeveer 600 km. De prototypes moesten daarbij ook rekening houden met de verschillende aspecten die de huidige voertuigen ook bieden, zoals: comfort, veiligheid, kosten, etc. Tabel 4.5 is een overzicht van prototypes te zien dat ontwikkeld is in het PNGV.

Auto-fabrikant	Voertuig	Jaar	Brandstofcel	Vermogen (kW)	Bereik (km)	Snelheid (km/h)	Brandstof
Chrysler	Necar 1	1994	Ballard	50	130	90	Waterstofgas
Chrysler	Necar 2	1996	Ballard	50	250	110	Waterstofgas
Chrysler	Necar 3	1997	Ballard	50	400	120	Vloeibare Methanol
GM	EV 1 FCV (hybride)	1997					Methanol
GM	Sintra	1997		50			Methanol
GM	Zafira	1998	Ballard	50	483	120	Methanol
Chrysler	Necar 4	1999	Ballard Mark 700	70	450	145	Vloeibare Waterstof
Chrysler	Jeep Commander (hybride)	1999	Ballard		970		Methanol
Ford	P 2000 SUV (concept)	1999	Ballard				Methanol
Ford	P 2000 HFC	1999	Ballard Mark 700	75	160		Waterstof
Chrysler	Necar 4 Advanced	2000	Ballard Mark 900	75	200	145	Waterstof
Chrysler	Necar 5	2000	Ballard	75	450	150	Methanol
Chrysler	DMFC (1-pers)	2000	Ballard DMFC	3	15	35	Methanol
Chrysler	Jeep Commander 2 (hybride)	2000	Ballard	50	400		Methanol
Ford	Think FC5	2000	Ballard Mark 901	65	128		Methanol
Ford	Focus FCV	2000	Ballard Mark 900	75	160	128	Waterstofgas
GM	Hydrogen 1, Zafira	2000	GM/Hydrogenics	80	400	140	Vloeibare Waterstof
GM	Precept FCEV (hybride)	2000	GM/Hydrogenics	100	800	193	Waterstofgas
Chrysler	Sprinter	2001	Ballard	75	150	120	Waterstofgas
Chrysler	Necar 5.2	2001	Ballard				Methanol
Chrysler	Natrium (hybride)	2001	Ballard	54	483		Natriumborohydride
GM	Hydrogen 3, Zafira	2001	GM/Hydrogenics	94	400	150	Vloeibare Waterstof
GM	Chevy S-10 (hybride)	2001	GM/Hydrogenics	25			Schone benzine
Chrysler	F-Cell (hybride)	2002	Ballard				Waterstof
Ford	Advanced Focus	2002	Ballard Mark 902	68	320		Waterstofgas
GM	AUTOonomy (concept)	2002					
GM	Hy-Wire	2002	GM/Hydrogenics	94		160	Waterstofgas

Tabel 4.5: Overzicht van prototypes brandstofcelvoertuigen ontwikkeld door Daimler-Chrysler, Ford en General Motors in de periode 1993 - 2002 [Avadikyan et al., 2003]

In 2002 werd het PNGV vervangen door het FreedomCAR-programma. Volgens Avadikyan was hiervoor de reden dat de onderzoeken binnen het PNGV weer in lijn gebracht moest worden met de ontwikkelingen op technologisch, politiek en strategisch vlak bij de betrokken partijen. In de praktijk betekende dit dat het onderzoek zich vooral op het gebied van waterstof- en brandstofceltechnologie ging richten.

Deze focus paste bij het in 2003 gestarte "Hydrogen, FuelCells and Infrastructure Technologies Program" (HFCIT) wat de belichaming is van het Presidents Hydrogen Initiative³. Met deze financiële impuls in waterstoftechnologie wil president Bush de stij-

³De investering van 1,2 miljard dollar in waterstoftechnologie die in de State of the Union van 2003 door president Bush aangekondigd werd.

gende afhankelijkheid van Amerika in de energievoorziening, en dan met name van fossiele bronnen uit de OPEC-landen, laten afnemen. Ten tweede leidt de stimulering van waterstoftechnologie tot het verminderen van de uitstoot van met name klimaatveranderende emissies bij het verbruik en de productie van energie. Hiermee is het ook de bedoeling dat diverse duurzame energiebronnen gestimuleerd gaan worden. Tot slot wil de Amerikaanse president de betrouwbaarheid en de efficiëntie van de elektriciteitsvoorziening verbeteren.

De hoofddoelen van het onderzoeksprogramma moeten gerealiseerd worden samenwerking met private ondernemingen en andere bestaande onderzoeksprogramma's. Het resultaat van HFCIT moet zijn dat in 2020 waterstoftechnologie commercieel beschikbaar is voor Amerikanen op een praktische en kostenaantrekkelijke manier. Voor de transitie heeft het Amerikaanse ministerie van Energie een roadmap vastgelegd. In dit tijdspad zal in eerste instantie de nadruk gelegd worden op technologisch onderzoek, dat voor private ondernemingen risicovol is om te doen. Gedurende de vorderingen in het onderzoek is het mogelijk dat de eerdergenoemde doelstellingen bijgesteld worden, om te zorgen dat de financiële middelen gebruikt worden voor een maximale technologische ontwikkeling. In 2015 moet voldoende vooruitgang zijn gemaakt, zodat de private sector kan kiezen voor het commercieel beschikbaar maken van waterstoftechnologie. Vanaf 2015 zal de rol van de Amerikaanse overheid in de waterstoftransitie afnemen, omdat vanaf dat moment het onderzoek op het gebied minder risicovol is en de marktwerking dan kan gaan plaatsvinden [Avadikyan et al., 2003; Sperling and Cannon, 2004; US Department of Energy, 2004b]. Voor de komende jaren zijn de volgende doelstellingen vastgelegd [US Department of Energy, 2004b, a]:

- De productiekosten van waterstof kostencompetitief maken met de huidige fossiele brandstoffen (zie tabel 4.2 op bladzijde 51).
- De kostprijs van distributie van waterstof in 2010 verminderd hebben naar minder dan \$0,70 per kg waterstof voor centrale productie en naar minder dan \$0,60 per kg waterstof voor productie van waterstof ter plaatse.
- De opslag van waterstof in een voertuig mogelijk maken zodat een acceptabele actieradius bereikt kan worden (300 mijlen) binnen de beperkingen van de huidige voertuigen (volume, veiligheid, etc.)
- Het creëren van betaalbare brandstofcellen voor toepassingen in voertuigen. In 2010 moet de huidige kostprijs per kW verminderd zijn met \$200 naar \$45. In 2015 moet de kostprijs verminderd zijn naar \$30 per kW. In totaal is dit een vermindering van 85% die gerealiseerd moet worden waarmee een brandstofcel van een factor 10 duurder dan een verbrandingsmotor naar een factor 1,5 gaat. Naast de kostprijs wordt van de brandstofcel in 2010 een efficiëntie van 40% verwacht en een levensduur van 40.000 uur (ongeveer 4,5 jaar)
- Het maken, en voor Amerika accepteren, van een globale technische regulering met betrekking tot waterstoftechnologie toepassingen in voertuigen uiterlijk in 2010. Deze regulering vormt een basis voor de eisen die aan een brandstofcelvoertuig gesteld worden op onder andere het gebied van veiligheid en het omgaan met de technologie in de praktijk.
- Uiterlijk in 2010 een handboek publiceren met richtlijnen hoe op een veilige manier met waterstof omgegaan kan worden.

- Op informatief gebied in 2010 een grootschalig onderwijsprogramma van start gaan die het publiek inlicht over de transitie naar waterstoftechnologie en de betrokken technologieën.

Californië

Naast de landelijke programma's speelt de Amerikaanse staat Californië wereldwijd een belangrijke rol in de ontwikkeling van milieuvriendelijke voertuigen. Het klimaat in Californië in combinatie met de grote aantallen voertuigen zorgen voor veel overlast van de hoge emissieniveaus. Sinds 1970 mag de staat zelf een eigen set van normen voor emissies vastleggen, onafhankelijk van de Amerikaanse wetgeving. In 1990 resulteerde dit in de vorming van een "Zero Emission Vehicle" (ZEV) wetgeving: grote autofabrikanten werden verplicht om in 2003 ten minste 10% van hun verkopen uit ZEV-voertuigen te laten bestaan, voertuigen zonder schadelijke emissies. In de loop der jaren daarna is, door de lobby van de auto-industrie, de ZEV-wetgeving aangepast zodat in 2005 2% van de verkopen een ZEV-voertuig moet zijn [Hoed, 2004a].

4.6.2 Canada

Sinds 1998 staat de ontwikkeling van brandstofceltechnologie, in het kader van klimaatverandering en de ontwikkeling van nieuwe autotechnologie, op de politieke agenda van Canada. In de ontwikkeling van de technologie wordt gebruik gemaakt van een samenwerkingsverband tussen de overheid, bedrijven en universiteiten. De universiteiten vormen een gespecialiseerde kennisbron op het gebied van brandstofceltechnologie. Tot op heden is het onderzoek verricht in Canada meer fundamenteel geweest, maar voor de komende jaren verwacht Avadikyan dat Canada zich meer zal bezig gaan houden met het demonstreren en toepassen van brandstofceltechnologie [Avadikyan et al., 2003].

In Canada is één van de belangrijkste actoren op het gebied van brandstofceltechnologie gevestigd, namelijk Ballard Power Systems. Dit bedrijf is in 1979 opgericht door de geofysicus G. Ballard met een team van twee ingenieurs / onderzoekers. In eerste instantie richtte het bedrijf zich op onderzoek naar oplaadbare lithiumbatterijen, maar vrij snel kwam daar onderzoek naar brandstofceltechnologie bij. In 1983 slaagde Ballard erin om bij de Canadese National Research Council een opdracht te bemachtigen voor de ontwikkeling van een PEM-systeem. Vanaf 1989 zocht Ballard een strategische aanpak door naast overheidsfinanciën ook op zoek te gaan naar financiers uit het bedrijfsleven. Deze aanpak leidde ertoe dat Ballard momenteel de leider is op het gebied van PEM-brandstofceltechnologie. Ballard heeft samenwerkingsverbanden met onder andere DaimlerChrysler en Ford [Avadikyan et al., 2003; Ballard Power Systems, 2004].

4.6.3 Japan

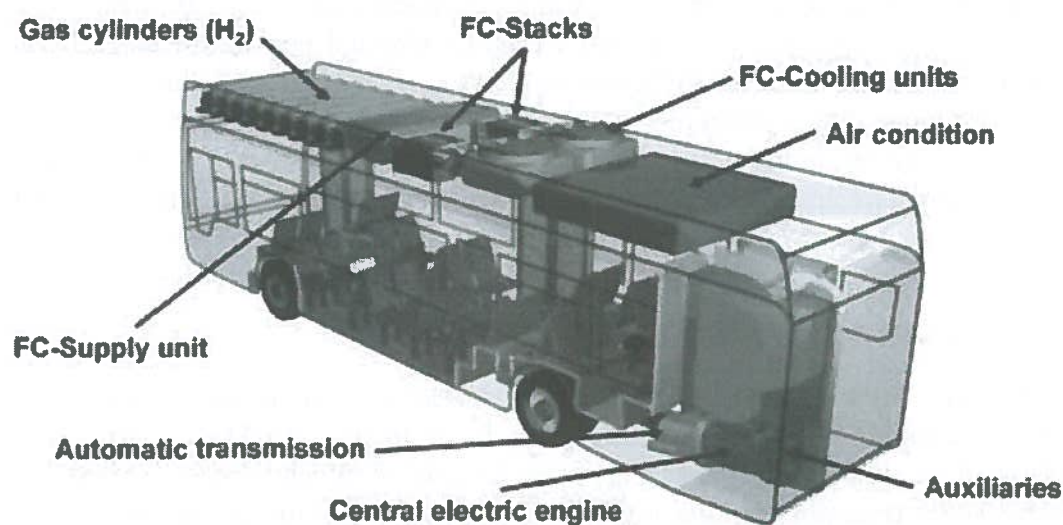
Sinds de jaren 90 investeert Japan in brandstofceltechnologie als belangrijk onderdeel van de toekomstige energiehuishouding. De focus in de ontwikkeling ligt op de PEM-brandstofcel en stationaire toepassingen van brandstofceltechnologie. Ontwikkelingen op het gebied van transport komen uit individuele onderzoeksprojecten van voertuigfabrikanten, die bijna deelnemen in internationale innovatienetwerken. Omdat een transitie naar brandstoftechnologie om veel investering vraagt is Japan bezig om gezamenlijke onderzoeksprogramma's op te zetten tussen private en publieke ondernemingen [Avadikyan et al., 2003].

4.6.4 Europa

Net als Japan ziet Europa brandstofceltechnologie als een belangrijk onderdeel van de toekomstige energiehuishouding. Alleen op het onderzoek- en ontwikkelingsgebied is er nauwelijks sprake van een Europese strategie doordat de verschillende Europese landen afzonderlijke activiteiten ontplooiën. Hierdoor is er ook nauwelijks sprake van een (Europese) bijdrage aan de ontwikkeling van brandstofceltechnologie, doordat de individuele partijen over onvoldoende financiële middelen beschikken om grote onderzoeken op te zetten. Op Europees niveau wordt er momenteel aangewerkt om tot een bredere samenwerking te komen op Europees niveau met daarin een breder budget voor onderzoek. Een uitkomst van deze samenwerking is het CUTE -demonstratieproject in verschillende Europese steden, waar in de volgende paragraaf verder op ingegaan zal worden. Naast CUTE zijn er nog verscheidene andere projecten in Europa: PURE (Engeland), Cymru H2 Wales (Engeland), CITYCELL (Duitsland, Frankrijk), H2 MUC (Duitsland), ECTOS (IJsland), etc. [Avadikyan et al., 2003; European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, 2006].

4.7 Clean Urban Transport for Europe

CUTE is een demonstratieproject met als doel de haalbaarheid van een innovatief, energie-efficiënt, schoon openbaar vervoer aan te tonen. In het kader van dit project rijden er gedurende twee jaar drie brandstofcelbussen, van het model Citaro, (zie figuur 4.4) sinds 2003 in negen Europese steden, namelijk: Amsterdam, Barcelona, Hamburg, Londen, Luxemburg, Madrid, Porto, Stockholm en Stuttgart. Het doel van dit project is om kennis ervaring op te doen met de toepassing van waterstof- en brandstofceltechnologie in de praktijk. In tabel 4.6 is te zien hoe in elke stad de waterstof geproduceerd wordt, wat de speciale omstandigheden zijn en wat de lokale actoren zijn. Naast CUTE lopen nog twee soortgelijke demonstratieprojecten met de Citaro-bus, namelijk ECTOS in Reykjavik en STEP in Perth [Fuel Cell Bus Club, 2004].



Figuur 4.4: Schematische tekening van de brandstofcelbus Citaro die gebruikt wordt in CUTE [Fuel Cell Bus Club, 2004]

Plaats	Productie methode	Waterstofproductie infrastructuur	Energiebron	Lokale Omstandigheden	Lokale Partners
Amsterdam	Elektrolyse	Productie lokaal	Groene stroom		1. Shell Hydrogen, Hoekloos 2. Gemeente Amsterdam - Dienst Milieu & Bouwtoezicht, GVB Amsterdam
Barcelona	Elektrolyse	Productie lokaal	Zonne-energie Grijze stroom	Warm klimaat	1. BP 2. Transports Metropolitans de Barcelona S.A.
Hamburg	Elektrolyse	Productie lokaal	Groene stroom	Vlakke omgeving	1. BP, Hamburgische Electricitäts Werke AG 2. Hamburger Hochbahn AG
Londen	Stoomraffinage	Centrale productie Transport vloeibaar	Olíe	Gemiddeld klimaat	1. BP 2. London Bus Services Limited, First Group plc.
Luxemburg	Elektrolyse	Productie lokaal	-		1. Air Liquide 2. Autobus de la ville de Luxembourg
Madrid	Stoomraffinage	Productie lokaal	Aardgas		1. Repsol, Gasnatural, Air Liquide 2. Empresa Municipal de Transportes
Porto	Stoomraffinage	Productie lokaal	-	Warm klimaat, heuvelachtig	1. BP 2. Sociedade de Transportes Colectivos do Porto SA
Stockholm	Elektrolyse	Productie lokaal	Waterenergie	Koud klimaat	1. Fortum 2. AB Storstockholms Lokaltrafik, Busslink i Sverige AB, City of Stockholm - Environment and Health Protection Administration
Stuttgart	Stoomraffinage	Productie lokaal	-	Heuvelachtig	1. BP, EnBW AG 2. Stuttgarter Strassenbahnen AG, Switch

Tabel 4.6: Overzicht van deelnemende steden in CUTE met de belangrijkste factoren. Bij lokale partners wordt er een onderscheid gemaakt tussen actoren verantwoordelijk voor de brandstofvoorziening (aangegeven achter de 1.) en de actoren die de busse gebruiken (aangegeven achter de 2.) [Fuel Cell Bus Club, 2004]

4.7.1 Actoren

De verschillende actoren die betrokken zijn bij CUTE kunnen als volgt verdeeld worden [Fuel Cell Bus Club, 2004]:

- Europese Commissie, subsidieert in het kader van het vijfde raamwerk voor onderzoek, technologieontwikkeling en demonstraties onder andere CUTE.
- Evobus, onderdeel van de Daimlerchrysler groep, levert 27 aangepaste stadsbussen van het type Citaro aan de verschillende steden binnen het CUTE project. Aan het ECTOS project in Reykjavik zijn ook door Evobus drie bussen geleverd.
- Brandstofleveranciers, zorgen ervoor dat de waterstof geproduceerd wordt en bij het tankstation afgeleverd wordt.
- Openbaarvervoerbedrijven, zorgen ervoor dat de bussen opgenomen worden in het bestaande netwerk van openbaarvervoer.

Elk van deze groep van actoren heeft een eigen belang om deel te nemen aan de demonstratieprojecten: de EC kan de ontwikkeling van schonere technologieën stimuleren, de busfabrikanten kunnen hun concurrentiepositie verbeteren, de brandstofleveranciers

kunnen naast verbetering van de concurrentiehun imago verbeteren en de openbaarvervoerbedrijven krijgen door deelname de kans om het OV te promoten.

4.7.2 Technologie

Voor de productie van de waterstof wordt gebruik gemaakt van een drietal methoden, namelijk elektrolyse, stoomraffinage en raffinage uit olie. Bij deze methodes wordt ook gebruik gemaakt van verschillende energiebronnen en centrale productie of productie ter plaatse. Bij centrale productie wordt rekening gehouden met de mogelijkheid dat er meerdere afnemers voor de waterstof komen en er kan geëxperimenteerd worden met het vervoeren van de waterstof naar een tankstation [Fuel Cell Bus Club, 2004].

De Citaro-bus waarmee gereden wordt is een aangepaste versie van de standaard bij Evobus verkrijgbare dieselbus. De elektromotor, versnellingsbak en de stuurinrichting bevinden zich op dezelfde plek als bij de standaarduitvoering, maar op het dak bevindt zich de waterstofinstallatie. In totaal bevinden zich op het dak negen waterstofcilinders die 5kg waterstof onder een druk van 350 bar bevatten. De PEM-brandstofcel in de bus levert een vermogen van 205kW [GVB, 2004].

4.7.3 Doelstellingen

CUTE heeft als algemeen onderzoeksdoel om in twee jaar tijd kennis en ervaring op te bouwen op het gebied van de toepassing van waterstof in mobiele sectoren en de haalbaarheid van waterstoftechnologie in het personenvervoer aan te tonen. Dit algemene doel wordt gesplitst in drie onderzoeksgebieden. Het eerste gebied waar naar gekeken wordt is de productiemethode en -plaats voor de waterstof. Voor de productiemethoden wordt er een onderscheid gemaakt tussen elektrolyse en stoomraffinage. Voor de productieplaats wordt onderscheid gemaakt tussen centrale productie (niet bij het tankstation voor de bussen) met transport naar het tankstation en productie ter plaatse. Het tweede gebied waar naar gekeken wordt is het voltanken van de bussen bij tankstations. Bij alle tankstations zal de waterstof in gasvorm onder druk getankt worden. Het derde gebied waar naar gekeken wordt is het functioneren van de bus in de praktijk. Er wordt gekeken naar het rijgedrag en onderhoud van de bus. Veiligheid- en milieuaspecten zijn aandachtspunten, maar ook de ervaring en beleving van de participanten en het publiek met de brandstofcelbus [Fuel Cell Bus Club, 2004].

4.7.4 Onderzoeksmethode

Voor de uitvoer van het experiment wordt één type bus gebruikt, de Citaro van Evobus, die in verschillende combinaties van omstandigheden gedurende twee jaar gebruikt zal gaan worden. Zo is het klimaat één van de factoren die varieert, maar ook de hoogtevariëaties in de omgeving. De bussen zullen zich ook moeten inpassen in, de voor elke stad specifieke, openbaarvervoerssysteem. Naast het gebruik wordt er ook gevarieerd in productiemethoden van waterstof. Zo worden er verschillende energiebronnen gebruikt om uiteindelijk waterstof te produceren. De waterstof wordt op één centrale plek geproduceerd of ter plaatse bij het tankstation [Fuel Cell Bus Club, 2004].

Door deze variaties ontstaat een negental verschillende werkpakketten voor CUTE, die elkaar overlappen maar nergens hetzelfde is. In alle CUTE-steden wordt uitvoerig data verzameld op de gebieden van de doelstellingen, en deze gegevens worden in een centrale database geplaatst. Deze database wordt vervolgens gebruikt om vergelijkingen tussen het

functioneren van de bussen in verschillende steden mogelijk te maken. ECTOS en STEP vormen lossen projecten, maar de informatie uit deze projecten zullen ook vergeleken worden met de gegevens uit de CUTE-database. Het CUTE-project is dus een project waarbij het leren centraal staat [Fuel Cell Bus Club, 2004].

Hoofdstuk 5

Overige Ontwikkelingen

In dit hoofdstuk zullen een aantal ontwikkelingen in het kort besproken worden die naast waterstoftechnologie een rol zullen gaan spelen in de scenario's. Er is hierbij een onderscheid gemaakt tussen ontwikkelingen op niche en landschapsniveau. Voor de niche ontwikkelingen geldt dat ze elk een bijdrage zouden kunnen leveren aan het oplossen van één of meerdere problemen in de problematiek van het personenvervoer. De landschapsfactoren vormen meer sturende factoren

5.1 Niches

5.1.1 Rekeningrijden

Momenteel betaalt elke automobilist in Nederland, via de wegenbelastingen, een vast bedrag voor onder andere het onderhoud aan de infrastructuur. Deze wegenbelastingen staan niet in verhouding met het daadwerkelijke rijgedrag van de reizigers. Iemand die de auto weinig gebruikt betaalt zo dus evenveel als iemand die de auto veel gebruikt. Vanuit de overheid is er de wens om de vaste wegenbelasting in verhouding te brengen met het daadwerkelijke weggebruik met behulp van rekeningrijden. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt tussen een kilometerheffing en een spitsheffing. Het systeem van vaste lasten wordt vervangen door een dynamisch systeem van een kilometerheffing, waarbij de automobilist betaald per afgelegde kilometer. Daarnaast kan een spitsheffing gebruikt worden die afhankelijk is van: het tijdstip van reizen en de plek van reizen. Naast het in verhouding brengen van het autogebruik met de daarbij behorende kosten, moet rekeningrijden de weggebruiker bewuster maken van zijn of haar rijgedrag. Een automobilist wordt bijvoorbeeld aangemoedigd door de spitsheffing om te plannen wanneer hij / zij de weg opgaat en via welke weg de reis plaatsvindt [Hoof, 2001; Mols, 2004].

Voor registratie van het weggebruik bestaat verschillende mogelijkheden. Zo kan er gebruik gemaakt worden van tolpoorten of kilometerstanden. Een ander systeem is gebruik te maken van een boordcomputer (OBU) in de auto, die via een satellietnavigatiesysteem bijhoudt waar de automobilist rijdt en hoeveel tol er betaald moet worden. De betaling van de kosten kan vervolgens op verschillende manieren geschieden [Hoof, 2001; Mols, 2004].

Voor de invoering van rekeningrijden zijn er momenteel nog een aantal barrières. Zo is er nog geen technologische infrastructuur aanwezig. Daarnaast is er nog op politiek / beleidsmatig niveau een probleem met betrekking tot de acceptatie van rekeningrijden als alternatief voor het huidige stelsel van wegenbelasting [NRC Handelsblad, 2005].

5.1.2 Congestion Charge

In de strijd tegen de congestie binnen steden is het mogelijk om de voertuigen die een stad in willen te belasten. In Londen loopt sinds 17 februari 2003 een experiment met een 'congestion charge'. Dit betekent dat elke automobilist die het centrum van Londen in wil, het gebied binnen de inner Ring Road, vijf pond tol moet betalen. Deze tolheffing is geldig van maandag tot en met vrijdag van zeven uur 's ochtends tot half zeven 's avonds. Voor speciale groepen zijn kortingsmogelijkheden mogelijk. Bewoners van het centrum krijgen een korting van 90%. Gehandicapten, taxi's, bussen, ambulances, motorrijders en auto's op milieuvriendelijke brandstoffen krijgen gehele vrijstelling van de congestion charge.

Met behulp van een camerasysteem rondom het centrum van Londen wordt bijgehouden welke auto's het centrum in- en uitrijden. In een database wordt bijgehouden waar en wanneer een voertuig het centrum ingaat. Met digitale beeldbewerking worden automatisch de nummerborden van voertuigen herkend en kunnen gegevens aan de database toegevoegd worden over de eigenaar van het voertuig en of deze al betaald heeft. Wanbetalers kunnen een boete van 40 tot 80 Engelse pond tegemoet zien komen. De opbrengsten van de tolheffing, jaarlijks geschat op 130 miljoen pond, worden gebruikt om de openbare vervoersdiensten in Londen te verbeteren.

Na het eerste half jaar zijn de resultaten van het experiment positief. Het aantal auto's dat het centrum inrijdt per dag is verminderd met 16%. De meerderheid van de groep die niet meer met de auto naar het centrum gaat, is overgestapt op het openbaar vervoer¹, ging carpoolen of gebruikte de fiets of de scooter. Voor de auto's die nog wel naar het centrum van Londen rijden hebben minder last van files. Het aantal opstoppen is met 30% verminderd, rittijden daalden met 14% en het aantal ongelukken in het centrum nam met 20% af. De enige tegenvaller voor Londen is dat door het succes van de tolheffing de opbrengsten veel lager zullen uitvallen, namelijk maar 68 miljoen pond in plaats van de 130 miljoen pond begroot [Mols, 2004; Transport for Londen, 2004].

Momenteel is het grootste bezwaar tegen de invoering van een congestion charge dat het een zeer radicale maatregel is. In het huidige Nederlandse beleid wordt het gedrag van reizigers in beperkte mate gestuurd door de verhoging van parkeertarieven. Met de congestion charge gebruikt Londen een financieel middel dat reizigers zeer dwingend stimuleert om de auto buiten het centrum van Londen te laten. Door het succes van Londen met de congestion charge wordt het bezwaar tegen de invoering van een congestion charge voor steden in Nederland kleiner.

5.1.3 Biobrandstoffen - Biodiesel

Naast de huidige fossiele brandstoffen is het mogelijk om biobrandstoffen, uit biomassa, te produceren. Eén van deze biobrandstoffen is biodiesel². Biodiesel is een mengsel van plantaardige oliën dat qua eigenschappen grote overeenkomsten vertoont met gewone dieselbrandstof. Koolzaadolie, zonnebloemolie, palmolie, sojaolie of gewone vetten kunnen gebruikt worden als biodiesel nadat een chemische reactie met methanol heeft plaatsgevonden. Het resultaat is een methylester met een hoge brandstofkwaliteit, die qua eigenschappen vergelijkbaar is met normale diesel. Hierdoor is het mogelijk om bi-

¹Voor de invoering van de congestion charge vormde het openbaar vervoer al de belangrijkste vervoersmodaliteit in Londen.

²Omdat alleen biodiesel gebruikt wordt in de scenario's is ervoor gekozen om de beschrijving van biobrandstoffen te beperken tot biodiesel.

odiesel te gebruiken in de huidige dieselveertuigen nadat een aantal rubberen dichtingen en brandstofleidingen biodieselbestendig zijn gemaakt.

Biodiesel kan geproduceerd worden uit gewassen, waarmee over de gehele energieketen gezien een CO₂-emissie reductie haalbaar is van 50% ten opzichte van normale diesel. Biodiesel is niet giftig, biologisch afbreekbaar en bevat zeer weinig zwavel en aromaten. Aan de luchtvervuilende kant is het effect van biodiesel nog onduidelijk, in het bijzonder op het gebied van fijne deeltjes.

Momenteel wordt de grootste barrière voor biodiesel gevormd doordat de productieprijs bijna twee keer zo groot is als voor gewone diesel (€0,60 per liter). Zonder accijnsverlaging is biodiesel niet in staat te concurreren met gewone diesel. Een barrière die op termijn kan ontstaan voor biodiesel is dat er veel ruimte nodig is om de benodigde biomassa te verbouwen³. In Nederland is er onvoldoende ruimte beschikbaar om alle fossiele brandstoffen te vervangen door biodiesel [EMIS, 2004; Mallant, 2004].

5.1.4 Alternatieve aandrijvingstechnologieën

Momenteel maken alle voertuigen voor hun aandrijving gebruik van alleen een verbrandingsmotor. Op nicheniveau zijn er hiervoor een aantal alternatieve voertuigconcepten in ontwikkeling. In het vorige hoofdstuk is de brandstofcel in combinatie met een elektromotor aan bod geweest, maar ook elektrische voertuigen en hybride voertuigen vormen alternatieven.

Elektrische voertuigen

Naast voertuigen die gebruik maken van alternatieve brandstoffen is er de mogelijkheid om een voertuig volledig elektrisch te maken. Als energiebron gebruikt de auto dan elektriciteit die opgeslagen wordt in het voertuig met behulp van batterijen of accu's. Een elektromotor wordt, net zoals bij de waterstoftechnologie, gebruikt om elektriciteit om te zetten in beweging.

Elektriciteit kan evenals waterstof uit een groot scala aan energiebronnen geproduceerd worden. Voordeel ten opzichte van waterstof is dat de huidige productiemethoden van energie gericht zijn op de productie van elektriciteit. Nadeel van elektriciteit is dat het moeilijk op te slaan is in batterijen. In voertuigen betekent dit dat grote, en daardoor zware, batterijen nodig zijn om een voertuig een acceptabele actieradius te geven.

Al jaren worden elektrische voertuigen gezien als één van de belangrijkste vormen van transport voor de toekomst. Alleen de langzame ontwikkelingen op het gebied van batterijtechnologie hebben ertoe geleid dat ontwikkelaars zijn gaan kijken naar alternatieve energiedragers, zoals waterstof. De verwachting is dat elektrische voertuigen geen belangrijke concurrent gaan vormen voor waterstoftechnologie tenzij er onverwachts grote vooruitgang geboekt wordt op het gebied van de batterijtechnologie.[EMIS, 2004; Hoed, 2004a, b].

Hybridevoertuigen

Als concurrent op de korte termijn zijn hybridevoertuigen sterk in opkomst. In het algemeen is een hybridevoertuig een combinatie van twee aandrijvingvormen (verbrandings-

³Om 100 PJ aan biodiesel te maken is een landoppervlak van 900km² nodig. In 2003 ging er meer dan 471PJ aan energie om in de vervoerssector. Dit betekent dat een landoppervlak van 3600km² benodigd is om alle diesel te verbouwen. Nederland is in totaal 4 miljoen hectare groot wat ongeveer gelijk is aan 4000km² [Mallant, 2004; CBS, 2004]

motor en elektromotor met accu) in een enkel voertuig, zoals de Toyota Prius, Honda Civic IMA. Deze hybridevoertuigen hebben ten opzichte van conventionele voertuigen een kleinere (maar nog steeds dominante), efficiënte verbrandingsmotor ondersteund door een elektromotor met accu. Deze vorm van hybridevoertuigen kunnen een bijdrage leveren aan het verminderen van de emissies. Tot ongeveer 50 km/h zal een hybride zoveel mogelijk gebruik maken van de elektromotor gevoed met behulp van accu's. Boven de 50 km/h zal voornamelijk de verbrandingsmotor het werk leveren waarbij bij vollast beide motoren ingeschakeld zullen zijn. In stedelijk gebied zullen hybride voertuigen voornamelijk aangedreven worden door de elektromotor en daardoor een bijdrage leveren aan de vermindering van geluidsemissies. Verder zal het brandstofverbruik per kilometer van een hybride gemiddeld lager liggen in vergelijking met een normaal voertuig.

Hybridevoertuigen hebben op dit moment nog een aantal barrières. Ten eerste is een hybridevoertuig in aanschaf en wegenbelasting duurder dan een conventionele auto. Door de dubbele aandrijving is een hybride duurder om te produceren en zwaarder ⁴. Dit zorgt ervoor dat de BPM en de wegenbelasting hoger zijn. Door een combinatie van BPM-korting en de besparing in brandstofkosten wordt deze barrière grotendeels gecompenseerd. Een tweede barrière is dat de meeste huidige hybridevoertuigen niet geschikt zijn voor zwaarder werk, zoals het trekken van een caravan. De oorzaak hiervan is dat de combinatie van de verbrandingsmotor met een elektromotor minder vermogen kan leveren dan een conventionele verbrandingsmotor [Garvelink, 2004b; Hoed, 2004a].

5.1.5 Automatische voertuiggeleiding

Bij het ontstaan en in standhouden van files is het grootste probleem dat iedere automobilist een eigen rijstijl heeft waardoor er, naast het rijden met verschillende voorkeurs-snelheden, verschillend op situaties gereageerd wordt. Bij een plotselinge regenbui rijdt de ene automobilist door alsof er niks aan de hand is, terwijl een andere de snelheid aanpast. De verschillende snelheden zorgen ervoor dat automobilisten elkaar gaan passeren om hun eigen snelheid zoveel mogelijk vast te kunnen houden. Het resultaat hiervan is een onregelmatig snelheidspatroon welke tot congestie leiden. Gedurende een congestie wordt de opstoppen verder versterkt doordat automobilisten elkaar nog steeds willen passeren.

Als nu iedereen met een constante snelheid zou rijden op de weg, dan zou de wegcapaciteit beter benut kunnen worden en dan zouden files sneller oplossen. Daarnaast heeft een constante rijsnelheid een positief effect op de vermindering van de milieuvervuiling. Het Cruise Control systeem is een dergelijk systeem waarmee de snelheid van de auto constant gehouden kan worden. Een stap verder gaat automatische voertuiggeleiding (AVG) waarbij de menselijke handelingen in het besturen van de auto (tijdelijk) vervangen worden door een geautomatiseerd verkeerssysteem [NWO, 2001; Wegen naar de Toekomst, 1998].

Om AVG te implementeren zijn er verschillende technologieën nodig. Allereerst moeten er een aantal veranderingen in de auto plaatsvinden. Belangrijke rol hierbij is weggelegd voor de boordcomputer in de auto die meer en meer de automobilist tijdens het rijden zal gaan ondersteunen. Een aantal van deze systemen zijn [NWO, 2001; Wegen naar de Toekomst, 1998]:

- Cruise Control: zorgt ervoor dat een automobilist met een constante snelheid kan rijden.

⁴de hybrideaandrijving (in combinatie met batterij) vormt ongeveer 10% van het totale voertuiggewicht

- Weginformatie: via dit systeem kunnen reizigers geïnformeerd worden over actuele verkeerssituaties, zoals maximumsnelheden, verwachte reistijd tot een bestemming.
- Navigatie: het plannen van de snelste route naar een bestemming waarbij gebruik gemaakt wordt van weginformatie over actuele verkeerssituaties (bijvoorbeeld files en wegwerkzaamheden)
- Afstandsassistent: geeft een waarschuwingssignaal als een object te dicht in de buurt komt van het voertuig. Wordt momenteel gebruikt als ondersteuning bij het parkeren, maar kan ook gebruikt worden om afstand tot andere voertuigen in de rijbaan te bepalen. Gekoppeld aan het Cruise Control systeem kan de snelheid van het voertuig aangepast worden om een veilige rijafstand te houden.
- Wegliggingassistent: geeft informatie aan de bestuurder wanneer deze ongewild, zonder knipperlicht te gebruiken, de rijbaan dreigt te verlaten. Momenteel wordt dit systeem getest in vrachtwagens om chauffeurs alert te maken als ze, zonder het aan te geven, van rijbaan dreigen te veranderen. Dit systeem kan gekoppeld worden aan de besturing van het voertuig om te zorgen dat het voertuig in het midden van de strook blijft rijden.

Momenteel en op korte termijn zal de rol van de boordcomputer beperkt blijven tot het geven van informatie en waarschuwingen, maar in de toekomst is het niet ondenkbaar dat de boordcomputer daadwerkelijk de besturing van de auto gaat ondersteunen. Als de afstand met een voorligger te klein wordt, dan kan de boordcomputer tijdelijk de snelheid iets verlagen om te zorgen dat de afstand veilig blijft. De boordcomputer kan de bestuurder ondersteunen zodat het voertuig midden in de rijbaan blijft rijden. De uiteindelijke rol van de boordcomputer is dan het totaal overnemen van de rol van de bestuurder [Wegen naar de Toekomst, 1998; Gruijl, 2005].

Naast de aanpassingen in de auto is er een koppeling nodig tussen AVG-voertuigen en de bestaande infrastructuur. Dit zogenoemde verkeersmanagementsysteem kan betrouwbare informatie leveren over de reistijd over het traject. Daarnaast kan het systeem de doorstroming optimaliseren door het te managen: verkeerstromen die bij elkaar komen op elkaar afstemmen, voertuigen om een vastlopend punt heen leiden, de afstand tussen individuele voertuigen regelen, eventuele uitwijkmanoeuvres aankondigen en de maximumsnelheid aangeven [NWO, 2001; Wegen naar de Toekomst, 1998; Gruijl, 2005].

In de verre toekomst is het niet onwaarschijnlijk dat de gehele infrastructuur omgezet wordt naar AVG, maar op korte termijn zal het beperkt blijven tot een toevoeging aan de bestaande infrastructuur. Hiervoor zijn een drietal redenen aan te wijzen. Allereerst is het niet realiseerbaar om in één keer de gehele infrastructuur en het gehele wagenpark aan te passen voor AVG. Ten tweede zullen niet alle reizigers bereid zijn om de besturing van een voertuig uit handen te geven, ze willen de keuze hebben. En ten derde vereist de aanleg van AVG enorme investeringen, die (deels) terugverdiend kunnen worden door er een betaalstrook van te maken.

In het project Wegen naar de Toekomst van het ministerie van Verkeer & Waterstaat wordt het volgende plaatje geschetst voor AVG. Via de boordcomputer in de auto wordt een reiziger geïnformeerd over het naderen van een AVG-traject. De reiziger krijgt dan informatie over de reistijd via de AVG-strook, reistijd via de normale weg en de kosten om gebruik te maken van het AVG-traject. Als de reiziger gebruik wil maken van de betaalstrook, dan sorteert deze zich voor op een speciaal invoegtraject waar de besturing van het voertuig overgenomen wordt door het AVG-systeem. De reiziger kan vervolgens rustig andere zaken gaan doen tijdens de rit [Wegen naar de Toekomst, 1998].

Een alternatief voor het plaatje van het project Wegen naar de Toekomst wordt gegeven in het Autoshuttle project. Wanneer een reiziger gebruik wil maken van de autoshuttle dan parkeert hij / zij het voertuig op een speciale cabine welke zich vervolgens over een traject gaat verplaatsen. Naast de al eerder gegeven voordelen van AVG biedt de autoshuttle als voordelen: bestaande voertuigen hoeven niet aangepast te worden, voertuigemissies kunnen verder gecentraliseerd worden⁵. Nadeel van het autoshuttle systeem is dat het systeem alleen nog in theorie werkt, maar in de praktijk is het functioneren nog niet gedemonstreerd [Gruijl, 2005; Steingröver and Krevet, 2005]

Momenteel wordt AVG voornamelijk in OV-toepassingen gedemonstreerd. De AVG-voertuigen rijden dan op aparte banen. In Eindhoven rijden sinds kort ook AVG-bussen als vorm van Hoogwaardig Openbaar Vervoer in het Phileasproject. Tussen het centrum van Eindhoven en de luchthaven rijdt elke tien minuten een AVG-bus langs de verschillende haltes. De interactie met normale voertuigen is zoveel mogelijk beperkt door gebruik te maken van een aparte baan. Op sommige plaatsen kruist het Phileastraject de normale infrastructuur, maar daar krijgen de bussen in principe voorrang [Gemeente Eindhoven, 2005].

Voor automatische voertuiggeleiding is momenteel de grootste barrière de inpassing van de noodzakelijke technologie in het verkeer en vervoerregime. AVG vereist een infrastructuur die aangelegd dient te worden en de huidige generatie van voertuigen moet geschikt gemaakt worden van AVG. De technologie moet zich hierbij nog bewijzen wanneer het ingepast wordt in de bestaande infrastructuur. Deze aanpassingen vragen om enorme investeringen welke de tweede barrière vormt.

5.2 Landschap

Voor de scenario's zal gebruik gemaakt worden van drie landschapsfactoren, namelijk: aardolie en brandstofprijzen, CO₂ en klimaatverandering en leefbaarheid en bereikbaarheid. Elk van deze factoren speelt een rol in meerdere regimes en is daar ook onder invloed van. Aardolie wordt niet alleen in het personenvervoer gebruikt, maar is ook van belang voor de petrochemische industrie. CO₂ en klimaatverandering is niet alleen een probleem binnen het personenvervoer, maar wordt ook veroorzaakt door energieverbruik in huishoudens en de industrie. In de bespreking van het personenvervoerregime (hoofdstuk 3) zijn de drie landschapsfactoren verder uitgewerkt voor het personenvervoer.

⁵de cabines gebruiken een eigen aandrijvingsysteem van elektriciteit, de milieuvervuilende emissies die eventueel vrijkomen bij de productie kunnen dan lokaal aangepakt worden

Hoofdstuk 6

Ontwerpen van sociotechnische scenario's

In de vorige hoofdstukken is informatie verzameld die inzicht geeft in de dynamiek van het personenvervoersysteem en welke ontwikkelingen er gaande zijn op landschap, regime en nicheniveau. Deze informatie vormt de basis voor het schetsen van een tweetal scenario's rondom een transitie naar waterstof in het personenvervoer. In dit hoofdstuk zal de gehanteerde methode besproken worden die voor het ontwerpen van de sociotechnische scenario's gebruikt is. Deze methode is gebaseerd op het stappenplan uit de ontwerpmethodologie voor de constructie van STSc (zie 2.3).

In paragraaf 6.1 zal kort een aantal kenmerken van een sociotechnisch scenario herhaald worden. Vervolgens zal in paragraaf 6.2 de gehanteerde ontwerpmethodode besproken worden. Ter afsluiting van dit hoofdstuk zal per scenario aangegeven worden welke ontwerpkeuzes er gemaakt zijn. Een deel van de gebruikte ontwerphulpmiddelen voor het ontwerpen van de scenario's zijn in bijlagen C en D. In hoofdstukken 7 en 8 zullen de ontworpen scenario's gepresenteerd worden.

6.1 Sociotechnische scenario's

In deze paragraaf zal kort besproken worden welke kenmerken een sociotechnisch scenario (STSc) heeft (zie voor een uitgebreidere beschrijving hoofdstuk 2). STSc vormen een methode om verschillende toekomstpaden in een transitie te verkennen. De STSc methode gaat uit van een multi-level perspectief op transitie. Dit betekent dat het te onderzoeken sociotechnische systeem verdeeld wordt in drie niveaus [Elzen et al., 1996]:

- **Regime:** een bestaand sociotechnisch systeem, bestaande uit een stelsel van regels, dat maatschappelijk door meerdere groepen gedragen wordt. Vanwege de belangen van de verschillende groepen ontstaat een gesloten systeem waarbij ontwikkeling vooral bestaat uit incrementele innovaties.
- **Niche:** een beschermde ruimte rondom een radicale innovatie. Zonder de bescherming zou een radicale innovatie niet in staat zijn zich voldoende te ontwikkelen om de concurrentie met bestaande technologieën in het regime aan te gaan. Niches worden gedragen door een netwerk van actoren die een hoge verwachting hebben van de innovatie.
- **Landschap:** de ruimere omgeving rondom meerdere regimes die niet direct beïnvloedbaar is door actoren vanuit het regime. Vanaf het landschapsniveau kan wel

invloed uitgeoefend worden op het regime.

Een STSc beschrijft de dynamiek van een sociotechnisch systeem gedurende een bepaalde tijdsperiode op alle drie de niveaus en de wisselwerking tussen de niveaus. Hierbij wordt het regimeniveau als rode draad in het verhaal gebruikt. De dynamiek beschrijft ontwikkelingen die plausibel zijn: ontwikkelingen komen niet uit de lucht vallen, maar zijn het gevolg van koppelingen tussen en op verschillende niveaus. Een STSc sluit aan op de huidige ontwikkelingsrichtingen in het systeem [Elzen et al., 2004].

Tot slot zijn er nog een aantal kenmerken voor een sociotechnisch scenario [Elzen et al., 1996]:

- Een STSc laat een co-evolutie van techniek en maatschappij zien.
- Een STSc is niet gebonden aan lineaire ontwikkelingspatronen. Er kunnen koppelingen plaatsvinden (tussen niches, tussen regime en niche, ...) of hybridisatie waardoor de ontwikkelingsrichting en -snelheid verandert.

6.2 Ontwerpmethode

Het scenario wordt in een drietal stappen ontworpen worden: (1) het maken van ontwerpkeuzes (2) het vertalen van de ontwerpkeuzes naar zogenoemde probleemtabellen (rond verschillende maatschappelijke problemen in het verkeer en vervoer) en (3) de probleemtabellen integreren tot een scenarioskelet. Deze drie stappen komen respectievelijk overeen met de stappen 1, 2 en 4 uit de methodologie voor het ontwerpen van sociotechnische scenario's (de methodologie is beschreven in 2.3). Stap 3 van de methodologie bestaat uit de analyse van de multilevel dynamiek, welke is uitgewerkt in de hoofdstukken 3 tot en met 5.

6.2.1 Ontwerpkeuzes

De twee ontworpen scenario's krijgen verschillende eigenschappen doordat verschillende ontwerpkeuzes zijn gemaakt voorafgaande aan het daadwerkelijk schetsen van de scenario's. Bij deze ontwerpkeuzes is er een onderscheid gemaakt tussen drie types: technische, inhoudelijke en contrasterende ontwerpkeuzes. De gemaakte ontwerpkeuzes leiden tot een contourschemet van het scenario (zie 6.3.1 en 6.3.2).

Technische ontwerpkeuzes

Technische ontwerpkeuzes hebben betrekking op de vormgeving van het scenario, maar zijn niet gerelateerd aan inhoudelijke aspecten van het scenario. Deze keuzes zijn:

- In het scenario wordt een transitie beschreven welke een lange termijn proces is. Daarom is gekozen om het tijdspad van de scenario's te laten lopen van 2005 tot 2050.
- Het scenario bestaat uit vier periodes die grofweg overeenkomen met de in 2.1 genoemde vier fases van een transitie: 2005 - 2015, 2015 - 2025, 2025 - 2035 en 2035 - 2050.

- In dit afstudeeronderzoek is het de bedoeling om te laten zien dat er contrasten in scenario's kunnen ontstaan ten gevolge van verschillende ontwikkelingen op het sociotechnische vlak. Vanwege de beperkte tijd voor het onderzoek is er voor gekozen om een minimaal aantal scenario's uit te werken om contrasten zichtbaar te maken. Dit betekent dat een tweetal scenario's uitgewerkt zal gaan worden.

Inhoudelijke ontwerpkeuzes

Inhoudelijke ontwerpkeuzes hebben betrekking op inhoudelijke aspecten die voor beide scenario's gelden:

- Dit afstudeeronderzoek richt zich op de rol die waterstoftechnologie in het personenvervoer kan spelen. In de scenario's zal daarom een transitie naar waterstoftechnologie beschreven worden.
- De prijs van ruwe olie zal gedurende lange tijd hoog blijven (zie 3.4.2)
- De welvaart en de daaraan gekoppelde mobiliteit van mensen zal blijven toenemen [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004].
- Biobrandstoffen zullen qua beschikbaarheid beperkt blijven in een bijgemengde vorm in combinatie met diesel (zie 5.1.3)
- De gemiddelde levensduur van een auto is tien jaar. Een verandering in de samenstelling van het wagenpark vindt geleidelijk plaats (ongeveer 10% van het wagenpark wordt per jaar vernieuwd) [Elzen et al., 1996].

Contrasterende ontwerpkeuzes

Contrasterende ontwerpkeuzes vormen de basis voor de verschillen in ontwikkelingen die de scenario's zullen vertonen. Er is gekozen om de contrasten te laten ontstaan door verschillen in beleidsvoering van de overheden. Zoals aangegeven in 3.5 kan er een onderscheid gemaakt worden tussen overheden op drie niveaus: Europees, nationaal en lokaal. Elk overheidsniveau heeft een aantal beleidsinstrumenten tot haar beschikking waarbij ruwweg een onderscheid gemaakt kan worden tussen economische en directe maatregelen (zie 3.5).

In paragraaf 6.3 zal voor beide scenario's de ontwerpkeuzes verder uitgewerkt worden. Er wordt aangegeven welke type maatregelen dominant zal zijn. In scenario 1 zal de nadruk liggen op economische maatregelen waar in scenario 2 de nadruk gelegd wordt op directe maatregelen. Verder zal een eerste uitwerking van de ontwikkelingen in het scenario, ten gevolge van de gemaakte ontwerpkeuzes, gepresenteerd worden.

6.2.2 Probleemtabelen

In de tweede stap wordt weergegeven hoe op verschillende niveaus (landschap, regime en niche) het scenario zich ontwikkelt ten gevolge van de gemaakte ontwerpkeuzes. Hierbij is het scenario verdeeld in de drie probleemgebieden uit hoofdstuk 3, namelijk (1) congestie, (2) bereikbaarheid & leefbaarheid en (3) milieu (bestaande uit gezondheidsbedreigende, luchtvervuilende en klimaatveranderende emissies).

De ontwikkelingen in de probleemgebieden worden weergegeven in tabelvorm, waarbij in de rijen de vier periodes aangegeven worden. In de kolommen wordt van links naar rechts beschreven:

1. de problemen aan het begin van de periode
2. de maatregelen en ontwikkelingen in de periode, waarbij zichtbaar moet worden:
 - De (incrementele) ontwikkelingen binnen het regime.
 - De nieuwe koppelingen ('novelties') die ontstaan in de multi-level dynamiek.
 - Het al dan niet doorbreken van de novelties in het regime.
3. individuele resultaten van de maatregelen en ontwikkelingen
4. een globale schets van hoe het probleemgebied er aan het eind van de periode eruit ziet.

De probleemtabelen zijn in bijlage C geplaatst.

6.2.3 Scenarioskelet

Tot slot zal het scenarioskelet gemaakt worden door de drie probleemtabelen (zie appendix C) te integreren met elkaar. Het scenarioskelet wordt weergegeven in tabelvorm waarbij elke periode een rij vormt. De tabel bestaat verder uit een viertal kolommen die, in de volgorde waar ze in het scenario voorkomen, beschrijven:

1. nieuwe ontwikkelingen: de ontwikkelingen die hun intrede in het regime maken gedurende een periode ten gevolge van koppelingen tussen landschap-, regime- en nicheniveau
2. regime ontwikkelingen: de veranderingen op regime niveau ten gevolge van intensivering van bestaande middelen en het introduceren van nieuwe ontwikkelingen
3. probleemontwikkelingen: een schets van hoe de probleemgebieden zich gedurende een periode ontwikkeld hebben ten gevolge van de regimeontwikkelingen
4. niche ontwikkelingen: de ontwikkelingen die op nicheniveau hebben plaatsgevonden

Aan het einde van het scenarioskelet zullen nog een aantal tabellen weergegeven worden die ontwikkelingen in het regime in kwantitatief uitdrukken, zoals: verhouding OV versus auto, brandstofverdeling in het wagenpark, samenstelling nieuw wagenpark.

De ontworpen scenarioskeletten zijn in bijlage D beschreven.

6.3 Ontwerpkeuzes

In deze paragraaf zullen de ontwerpkeuzes uit 6.2.1 verder uitgewerkt worden per scenario. Per scenario wordt eerst aangegeven welk type overheidsmaatregelen dominant zal zijn in het scenario. Vervolgens zal per probleemgebied kort aangegeven worden welke ontwikkelingen, ten gevolge van de gemaakte ontwerpkeuzes, zullen plaatsvinden.

6.3.1 Scenario 1 - een economisch-liberale overheid

In het eerste scenario is het beleid van de overheden economisch van aard. Aan de verschillende problemen in het personenvervoer wordt een prijskaartje gekoppeld. Overheden op verschillende niveaus zullen, in tegenstelling tot scenario 2, het zoveel mogelijk proberen te vermijden om inhoudelijke in te grijpen en zoveel mogelijk ruimte overlaten voor marktwerking. Pas wanneer problemen te groot worden zal er door de overheid inhoudelijk ingegrepen worden.

In de vervoerskeuze van reizigers zal de overheid geen sturende rol op zich overnemen, maar de verantwoordelijkheid bij de reiziger neerleggen. De rol van waterstoftechnologie in dit scenario is de concurrentie aangaan met de huidige technologieën in het personenvervoerregime.

Congestie: De overheid zal proberen de doorstroming op het wegennet te verbeteren door: optimalisatie infrastructuur, beperkte uitbreiding van infrastructuur en de introductie van een spitsheffing. De genomen maatregelen zullen onvoldoende zijn om de mobiliteitsgroei op te vangen waardoor de congestie blijft toenemen. Op een gegeven moment zal de congestie dusdanig toegenomen zijn dat er sprake is van onacceptabele economische schade. Vanaf dat moment zal de overheid ingrijpen door de introductie van automatische voertuiggeleiding te stimuleren.

Bereikbaarheid en Leefbaarheid: De lokale overheden zullen de leefbaarheid proberen te verbeteren zonder dat dit ten kostte gaat van de bereikbaarheid. Overlast van grote types voertuigen wordt verminderd door parkeertarieven afhankelijk te maken van het formaat van een voertuig. Dit stimuleert de aankoop van een extra kleiner voertuigen voor in de stad. De overlast van grote voertuigen in de stad neemt af, maar er ontstaan een nieuw probleem in de woonwijken. De toename van het aantal voertuigen leidt in de woonwijken tot parkeerproblemen.

Milieu: Op milieugebied zullen vanaf Europees niveau emissienormen voor voertuigen vastgelegd worden. De al bestaande gezondheidsbedreigende en luchtvervuilende emissienormen (voor CO, NO_x, VOS en PM) worden uitgebreid met klimaatveranderende emissienormen (voor CO₂ en CH₄). De Nederlandse overheid zal klimaatvriendelijkere voertuigen en brandstoffen stimuleren door introductie van een klimaatheffing en -accijns.

6.3.2 Scenario 2 - een sturende overheid

In scenario 2 zal vanuit de overheid naast de economische maatregelen uit scenario 1 meer gebruik maken van directe maatregelen. Dit directe ingrijpen zal beginnen in een enkele grote stad waar door de toenemende problematiek een draagvlak is ontstaan voor radicale maatregelen. Succes van radicale maatregelen zal overgenomen worden door andere grote steden. Naarmate meer steden volgen ontstaan landelijke effecten.

Aanleiding voor het inhoudelijke ingrijpen in scenario 2 is de aanhoudende problematiek van bereikbaarheid en leefbaarheid in de stad. Londen heeft met een radicale maatregel, de invoering van een congestion charge, laten zien dat het mogelijk is om lokaal een modal shift te laten plaatsvinden. In Nederland blijft het effect van deze maatregel niet onopgemerkt en zal overgenomen worden door een Nederlandse trendsetter. Er is voor gekozen om dit de stad Rotterdam te laten zijn.

Congestie: De overheid zal net zoals in scenario 1 aanvankelijk beginnen met het verbeteren met de doorstroming op het hoofdwegennet. Ontwikkelingen op lokaal niveau met de invoering van de congestion charge leiden langzaam ook op het hoofdwegennet tot een kleine modal shift. Dit effect op het hoofdwegennet zal verder worden gestimuleerd.

Bereikbaarheid en Leefbaarheid: Naar voorbeeld van Londen begint Rotterdam met de introductie van een congestion charge. De extra inkomsten door deze maatregel worden ingezet om openbaarvervoerdiensten te verbeteren. Andere grote steden (Amsterdam, Den Haag, Utrecht, ...) vinden het beleid van Rotterdam in eerste instantie te radicaal. Door toenemende lokale problematiek en het gebleken succes ontstaat in andere grote steden een draagvlak om het beleid van deze steden te kopiëren. Naarmate er meer steden volgen begint zich een modal shift af te tekenen die op landelijk niveau effecten krijgt.

Milieu: Op milieugebied zal eenzelfde beleid gevoerd worden als in scenario 1. Daarnaast zal de duurzame productie van waterstof gestimuleerd worden ten opzichte van minder klimaatvriendelijke productiemethoden door de introductie van een CO₂-heffing.

6.4 Het schrijven van het scenario

Na het maken van de ontwerpkeuzes en het uitwerken van de probleemtabelen en het scenarioskelet is het tijd om het tweetal scenario's uit te schrijven. Het resultaat hiervan is te zien in de hoofdstukken 7 en 8. Voor het uitschrijven van de scenario's is een vaste structuur gehanteerd:

- Naar voorbeeld van andere sociotechnische scenario's [Elzen et al., 2002, 2004] zal het scenario geschreven worden als “de geschiedenis van de toekomst”.
- Het scenario begint met een korte voorgeschiedenis. Deze voorgeschiedenis geeft de dynamiek van het recente verleden weer. Het ontworpen scenario start vanuit dit verleden en sluit aan op de bestaande ontwikkelingsrichtingen. Voor beide scenario's zal dezelfde voorgeschiedenis gebruikt worden.
- Elk scenario is onderverdeeld in vier tijdsperiodes: 2005 - 2015, 2015 - 2025, 2025 - 2035 en 2035 - 2050. Binnen een tijdsperiode worden er twee types ontwikkelingen beschreven. Allereerst worden de nicheontwikkelingen aangegeven per relevante niche: Wat gebeurt er in een niche? Welke koppelingen ontstaan en waarom? Vervolgens worden de regimeontwikkelingen aangegeven. Hierbij zal in een vaste volgorde per probleemgebied de ontwikkelingen beschreven worden. Aan het einde van elke periode zal in één alinea een samenvatting gegeven worden van de ontwikkelingen in de desbetreffende periode.
- Landschapsontwikkelingen grijpen in op zowel regime- en nicheniveau en zullen door beiden heen gewezen worden in de scenario's.

Hoofdstuk 7

Scenario 1: Een economisch liberale overheid

1990 - 2005: Een personenvervoersysteem in de problemen

Sinds het einde van de twintigste eeuw was het personenvervoerregime langzaam aan het veranderen. Hierbij was sprake van een interne dynamiek, het verbeteren van de bestaande technologieën, en een tweede maatschappelijk ingebedde dynamiek.

De interne dynamiek van het personenvervoer werd onderverdeeld in twee types ontwikkelingen, namelijk op het gebied van individueel vervoer (de auto) en collectief vervoer (openbaar vervoer). Binnen het individuele vervoer werden autofabrikanten, door de toenemende internationale concurrentie, gedwongen om nieuwe markten te zoeken en ontwikkelen. Het standaard all-purpose model auto (sedan, stationwagon) werd uitgebreid met diverse modellen, onder andere stadsvoertuigen, spacewagons en Sport Utility Vehicles (SUV). Met name het laatste model werd aan het begin van de eenentwintigste eeuw steeds populairder. Naast de diversificatie in het aanbod van automodellen werd het voor consumenten mogelijk om de auto steeds meer te verpersoonlijken. Consumenten kregen een breder aanbod in bekleding en de kleur van voertuigen, maar ook het aantal optionele accessoires nam sterk toe. Aan het begin van de 21^{ste} eeuw was de all-purpose auto nog steeds het dominante voertuigmodel. Verdere ontwikkelingen in het individuele vervoer kwamen van de gebruikerszijde van de auto. Allereerst werd er een trend van verdieseling zichtbaar. Door verbetering van de dieseltechnologie kozen automobilisten steeds vaker voor een dieservoertuig in plaats van een LPG- of een benzinevoertuig. Een andere trend in het regime die zich begon te ontwikkelen was het hebben van meerdere auto's per huishouden. Hieraan lagen twee oorzaken ten grondslag. Ten eerste begonnen vrouwen steeds mobieler te worden, door onder andere steeds meer buitenshuis te gaan werken. En ten tweede werd het gebruikelijk om voor verschillende doeleinden een ander voertuig te hebben. Een grote, comfortabele, auto voor langere ritten naar het werk en een kleine, makkelijk te parkeren, auto voor de boodschappen.

Het collectieve vervoer liet een dalend vervoersaandeel zien in het totaal aantal afgelegde reizigerskilometers ondanks de verbeteringen in de kwaliteit. Reden hiervoor waren dat het openbaar vervoer door reizigers werd gezien als: een tijdsinefficiënte vorm van vervoer, te duur, onbetrouwbaar op het gebied van reistijden en soms helemaal niet (meer) beschikbaar. Daarnaast werden steeds minder mensen afhankelijk van openbaar vervoer voor hun mobiliteit. Vrijwel elk huishouden had inmiddels een eigen auto tot haar beschikking, waarmee snel, goedkoop, betrouwbaar van deur-tot-deur gereden kon worden. Voor vervoersplanners, landelijk en stedelijk, vormde het openbaar vervoer een

middel om de bereikbaarheid te verbeteren en de congestie te verminderen.

De tweede dynamiek in het personenvervoersysteem werd gedreven door een bredere maatschappelijke inbedding. Hierbij werd een onderscheid gemaakt tussen de drie probleemgebieden van het personenvervoersysteem zelf (congestie, bereikbaarheid en leefbaarheid en milieu) en een probleem dat zich niet alleen beperkte tot het personenvervoersysteem (de beschikbaarheid van fossiele brandstoffen). De verschillende problemen zullen kort besproken worden.

Allereerst was er het probleem van congestie op het hoofdwegennet. Nadat gebleken was dat uitbreiden van de infrastructuur het probleem van congestie niet langdurig oploste, probeerde de landelijke overheid vanaf de jaren negentig een modal shift te stimuleren. Meer mensen in één auto of nog liever in het openbaar vervoer zou theoretisch het probleem van congestie oplossen. Aan het begin van de eenentwintigste eeuw, onder het kabinet Paars II, werd duidelijk dat in de praktijk de stimulering tot modal shift geen effect had en dat het gedrag van mensen nauwelijks veranderd was. Dit resulteerde erin dat de congestie alleen maar verder toegenomen was. Onder het kabinet van Paars II werd het stimuleren van een modal shift gestaakt en vervangen door een erkenning van het recht op individuele mobiliteit.

Een tweede probleem werd gevormd door bereikbaarheid en leefbaarheid op lokaal niveau. Stedelijke overheden probeerden de verschillende delen van hun steden bereikbaar te houden, maar tegelijkertijd moest op de leefbaarheid gelet worden. Toenemende mobiliteit in de steden leidde tot geluidsoverlast, luchtvervuiling, onveilige situaties en het verpestten van het uitzicht. Door lokale overheden werd het openbaar vervoer als essentieel gezien om zowel de bereikbaarheid als leefbaarheid in de stad te waarborgen.

Ten derde was er het milieuprobleem welke zich niet alleen beperkte tot het personenvervoer. Sinds de Europese integratie werden van Europees niveau de gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissies in voertuigen via steeds strengere emissienormen gereduceerd. Op deze manier werden voertuigen langzamerhand steeds schoner. Op het gebied van klimaatveranderende emissies werd internationaal gesproken, wat resulteerde in het Kyotoprotocol. Het protocol beschreef een internationaal streven om in 2012 de broeikasgasemissies te verminderen, met voor Nederland zes procent, ten opzichte van 1990.

Tot slot was er de toenemende bezorgdheid over de zekerheid in de brandstofvoorziening. Een eindige voorraad (goedkope) olie, een toenemende vraag naar olie en instabiliteit in de olie producerende regio's resulteerden in een steeds verder stijgende olieprijs. De stijgende olieprijs zorgde ervoor dat de pompprijs van fossiele brandstoffen steeds hoger werd en daarmee ontstond ruimte voor alternatieve brandstoffen.

Het aanhouden van de problematiek in combinatie met druk vanuit het landschap boden ruimte aan verschillende niches om zich te ontwikkelen en aansluiting te zoeken bij het regime. Er werd geëxperimenteerd in niches met onder andere: nieuwe aandrijvingstechnologieën (hybride, brandstofcel), brandstoffen (biologische, waterstof), automatische voertuiggeleiding, rekeningrijden en nieuwe vervoerconcepten (interliner, randstadrail, treintaxi's, car sharing, car on demand).

2005 - 2015: Gebrek aan klimaatvriendelijke alternatieven

Nicheontwikkelingen

Ontwikkelingen en uitkomsten in de periode 1995 - 2005 maakten de weg vrij voor de stimulering van bepaalde technologische niches waarin doelgericht werd gezocht naar op-

lossingen voor de verschillende problemen van congestie, bereikbaarheid en leefbaarheid en milieu. Ook in de periode 2005 - 2015 bleven de ontwikkelingen in het regime bestaande en nieuwe niches voeden.

De overheid streefde ernaar om het belastingstelsel voor het autogebruik te baseren op het daadwerkelijke autogebruik in plaats van op het autobezit. Dit leidde ertoe dat in 2010 **rekeningrijden** ingevoerd werd.

In de strijd tegen congestie werd **automatische voertuiggeleiding** (AVG) als een mogelijke lange termijn oplossing gezien, maar invoering van deze technologie was erg duur. Daarnaast had de technologie zich nog niet in de praktijk bewezen wanneer het ingepast zou worden in het bestaande verkeer. Sinds het einde van 2004 werd, met overheidssteun, in het Phileasproject AVG gedemonstreerd in Eindhoven. Als vorm van Hoogwaardig Openbaar Vervoer reden er tussen het centrum van Eindhoven en het nabijgelegen vliegveld snelle busdiensten op een aparte rijbaan. Doel van het project was om automatische voertuiggeleiding in een openbaar toegankelijke toepassing te demonstreren en testen.

In de strijd tegen de klimaatverandering was er druk vanaf het niveau van het sociotechnische landschap om klimaatvriendelijkere ontwikkelingen in het personenvervoer te stimuleren. Met de bestaande technologieën in het personenvervoer kon verbetering bereikt worden, maar dit werd als onvoldoende gezien om het probleem van klimaatverandering aan te pakken. Binnen het personenvervoer werden er nog geen reële alternatieven aanwezig geacht voor de verbrandingsmotorvoertuigen en de fossiele brandstoffen. Daarom stimuleerde de landelijke overheid op korte termijn de aanschaf van hybrides en het gebruik van biobrandstoffen.

Hybrides werden sinds 2003 op de markt gebracht door Toyota en Honda. Door de dubbele aandrijving in hybrides waren deze relatief duur. Daartegenover stond dat de hybrides onder de zuinigste categorie auto's vielen. De overheid stimuleerde de aankoop van hybrides met fiscaal voordeel, in de vorm van een BPM-vrijstelling.

Biobrandstoffen, in de vorm van biodiesel, werden als alternatief voor fossiele brandstoffen gezien om klimaatneutrale brandstoffen te krijgen. Voor toepassingen in de auto moest een gebruiker alleen een aantal afdichtingen vervangen door biodieselbestendige. Biobrandstoffen werden vanaf 2006 als mengsel van biodiesel en fossiele diesel (mixdiesel) aangeboden bij de tankstations. De productie van biobrandstoffen werd zoveel mogelijk in Nederland gedaan. Boeren die hun inkomsten vanuit voedselproductie zagen dalen gingen biomassa produceren¹. Deze biomassa werd vervolgens verkocht aan brandstofproducenten als Shell en BP, die de biomassa omzette in biobrandstoffen. Over de gehele productieketen van biobrandstoffen was de productieprijs twee keer zo hoog ten opzichte van fossiele brandstoffen. De overheid stimuleerde de verkoop van biobrandstoffen door een accijnsvoordeel waardoor de pomprijs van mixdiesel gelijk was aan die van fossiele diesel.

Op de lange termijn werd **waterstoftechnologie** als de oplossing gezien voor het klimaatprobleem. Doordat de technologie nog onvoldoende ontwikkeld was werden onderzoeken en demonstratieprojecten rondom waterstoftechnologie gestimuleerd. Het onderzoek focuste zich op de belangrijkste barrières voor de introductie van waterstoftechnologie, namelijk: het verlagen van de kostprijs van brandstofcellen, de productieprijs van waterstof en de opslag van waterstof in individuele voertuigen.

¹De aanleg van agrarische gebieden voor biomassaproductie werd door de Nederlandse overheid financieel gesteund, omdat hiermee de afhankelijkheid in brandstoflevering afnam.

Op het gebied van demonstratieprojecten liep tussen 2003 en 2006 het Clean Urban Transport for Europe (CUTE)-project met brandstofcelbussen in een negental Europese steden. Na afloop waren de verschillende betrokken partijen (steden, OV-bedrijven, industrie) zeer tevreden met de resultaten. De brandstofcelbussen bleken onder verschillende omstandigheden, even goed te presteren, als conventionele bussen met een verbrandingsmotor. Daarnaast waardeerden burgers en reizigers de lage geluidsemissies en de schone uitlaatgassen van de brandstofcelbussen. Het algemene beeld was dat deze technologie de leefbaarheid sterk zou kunnen bevorderen.

Omdat er nog onduidelijkheden waren over de lange termijnprestaties van de brandstofcelbussen en hoe de waterstofinfrastructuur uitgebreid kon worden, werd CUTE opgevolgd door CUTE2. In een looptijd van zes jaar werd gekeken hoe de bussen uit CUTE over een langere periode presteren. Daarnaast werden verschillende manieren onderzocht om de waterstofinfrastructuur uit te breiden, onder andere door het aantal deelnemende steden uit te breiden van negen naar veertig. In Nederland gingen naast Amsterdam nu ook Utrecht, Den Haag en Rotterdam deelnemen aan het demonstratieproject. Na afloop van CUTE2 hadden de brandstofcelbussen, zowel voor lokale overheden als busmaatschappijen, zich voldoende bewezen om over te gaan tot grootschalige stimulering en aanschaf.

Om commerciële toepassingen met waterstof mogelijk te maken werd in 2012 internationale richtlijnen afgesproken², waaronder veiligheidseisen voor toepassingen met waterstof. Daarnaast werden internationale plannen gemaakt om de introductie van waterstoftechnologie voor individueel vervoer zo soepel mogelijk te laten verlopen. Door de internationale richtlijnen werd de commercialisering van brandstofcelbussen bevorderd en ontstond een groeiend aandeel in de totale vervoersprestaties van het openbaar vervoer.

Regimeontwikkelingen

Om het **congestieprobleem** op het wegennet te verkleinen werd voornamelijk naar het hoofdwegennet (de snelwegen) gekeken. Voor uitbreiding van het wegennet was nog nauwelijks ruimte beschikbaar en bracht veel kosten met zich mee. Daarom werd het wegennet zoveel mogelijk verbeterd door optimalisatie. Bij knelpunten werd gekeken hoe de infrastructuur aangepast kon worden om de doorstroming te verbeteren. Op drukke trajecten werd dynamische wegingdeling geïntroduceerd. Door een combinatie van smallere rijbanen en lagere snelheden werd het mogelijk om de wegcapaciteit op een veilige manier te vergroten.

Naast de optimalisatie van de infrastructuur werd in 2010 rekeningrijden ingevoerd. De wegenbelasting werd vervangen door een vast tarief per afgelegde kilometer, de zogenoemde kilometerheffing. Daarnaast werd een spitsheffing geïntroduceerd om het reizen op bepaalde plekken en tijdstippen te kunnen ontmoedigen. Op tijdstippen en plaatsen waar de spitsheffing werd ingevoerd resulteerde dit in een ontwijkend gedrag van reizigers. Of de reis werd voortgezet langs een andere route of op een ander tijdstip. Het resultaat hiervan was dat de spits zich uitsmeerde: de spitsperiode duurde langer, maar breidde zich uit naar omliggende wegen.

Door de observatiesystemen van het wegennet te verbeteren werd het mogelijk om een beter beeld te krijgen van actuele verkeerssituaties op het gehele wegennet. Dat maakte het mogelijk om sneller en adequater te reageren op verstoringen van de doorstroming op

² De afspraken werden via verschillende commissies en organen gemaakt, zoals: de World Forum of Vehicle Regulations van de VN, Environmental Protection Agency (Amerika), Californian Air Resource Board, Europese Commissie en Law on Rational Use of Energy (Japan)

het wegnen. Daarnaast werden de observatiesystemen gekoppeld aan informatiesystemen om reizigers te informeren. Hierdoor werd het mogelijk om knelpunten te ontlasten door reizigers eromheen te leiden. Via borden boven de weg werden reizigers geïnformeerd over reistijden en eventuele snellere routes om knelpunten heen. Daarnaast gingen routeplanners (via internet, maar ook in de auto) gebruik maken van dynamische verkeersinformatie. Aan de hand van actuele verkeerssituaties werd het mogelijk om de snelste route naar een bestemming te bepalen.

De hiervoor genoemde maatregelen om de congestie te verbeteren leidden tot een betere doorstroming op het hoofdwegenet. Voor automobilisten was deze verbetering echter nauwelijks merkbaar, omdat het aantal auto's en de mobiliteit verder toenam. Voornamelijk in het individuele vervoer werd deze mobiliteitsgroei gerealiseerd. Het relatieve aandeel van individueel vervoer in het totale aantal reizigerskilometers steeg van 76% in 2005 naar 79% in 2015. De verbeterde observatie van het wegnen bracht een nieuw probleem aan het licht. Zo werd zichtbaar dat de congestie zich niet beperkte tot de snelwegen, maar ook uitspreidde over de andere delen van het wegnen. De congestie buiten het hoofdwegenet nam verder toe door de focus van de landelijke overheid op het hoofdwegenet en een toename in het aantal auto's en de mobiliteit.

Lokale verkeer en vervoersregelaars zagen het openbaar vervoer als essentieel voor de doorstroming en verbetering van de **bereikbaarheid en leefbaarheid** in de steden en gemeenten. OV-bedrijven zetten zich zoveel mogelijk in om de kwaliteit van hun diensten te verbeteren. De betrouwbaarheid van bussen werd verbeterd in combinatie met betere informatievoorziening naar reizigers. Doordat OV-bedrijven waren geprivatiseerd werd het winstoogmerk een steeds belangrijker uitgangspunt en pogingen tot verbetering werden geconcentreerd op winstgevende lijnen. Onrendabele lijnen werden zoveel mogelijk afgestoten om kosten te besparen en tarieven werden verder verhoogd. Ondanks alle veranderingen bleef het beeld van het OV onveranderd (te duur, tijdsinefficiënt, onbetrouwbaar en niet beschikbaar). Het totale aantal reizigerskilometers afgelegd bleef ondanks alle veranderingen constant. Door de toename in het aantal reizigerskilometers in het individuele vervoer daalde het aandeel van het collectieve vervoer van 12% in 2005 naar 9% in 2015.

Vanwege de positieve bijdrage aan de leefbaarheid en de kwaliteit van het openbaar vervoer bleven de brandstofcelbussen na afloop van het CUTE2 project in de betrokken steden rijden. Hierbij kregen de OV-bedrijven financiële steun van lokale overheden. Afgeschreven conventionele bussen werden vrijwel alleen nog vervangen door brandstofcelbussen waardoor het aandeel gestaag groeide. Onder de bevolking in Amsterdam, Utrecht, Rotterdam en Den Haag werd deze ontwikkeling gewaardeerd en ontstond een gevoel dat de leefbaarheid aan het verbeteren was. Dit trok de aandacht van kleinere steden (bijvoorbeeld Groningen, Eindhoven en Enschede) en leidde tot onderzoek naar de mogelijkheid om waterstoftechnologie ook daar te introduceren.

Het groeiende wagenpark zorgde lokaal voor steeds meer overlast en het toenemende aantal voertuigen verslechterde de bereikbaarheid in de steden. Daarnaast werd de trend naar meer SUV-voertuigen ook doorgezet. Dit had negatieve effecten op de leefbaarheid. Geluidsoverlast en ruimtebeslag namen toe terwijl gelijktijdig de verkeersveiligheid afnam. De overlast van de SUV-voertuigen leidde bij zowel overheid als burgers tot het ontstaan van een draagvlak in de steden voor werende maatregelen.

Op **milieugebied** werden door de Europese Commissie de emissienormen voor gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissies (koolmonoxide, stikstofdioxide,

vluchtige organische stoffen, zwaveldioxide en deeltjes) verder aangescherpt. Op het gebied van klimaatveranderende emissies argumenteerde de industrie dat er nog onvoldoende alternatieven op grote schaal beschikbaar waren. De overheid ging hier in mee en beperkte zich tot het stimuleren van het gebruik van biobrandstoffen en aanschaf van hybrides.

Doordat de olieprijs bleef stijgen, en daarmee de prijs van brandstoffen aan de pomp, werden energiezuinige voertuigen steeds aantrekkelijker voor de automobilist. Daarom, alsmede door het fiscale voordeel, wonnen hybrides snel in populariteit. De stijgende populariteit en verkoop van hybrides zorgden voor een schaalvoordeel en een dalende verkoopprijs. In de periode van 2005 tot 2015 steeg het aandeel van hybrides in de jaarlijkse verkoop van nihil tot vijftien procent. Rond 2015 was het aandeel van hybrides in het totalenwagenvoertuigenpark tot zes procent gestegen.

Omdat, door de stijgende olieprijs, de productiekosten van fossiele brandstoffen steeds verder toenamen konden biobrandstoffen steeds beter concurreren. Rond 2015 lagen de kosten voor de producent vrijwel gelijk, maar het accijnsvoordeel op biobrandstoffen maakten het voor automobilisten aantrekkelijker om aan de pomp mixdiesel te kopen. Het doel van de Europese Unie om in 2010 5,75% van de totale hoeveelheid geleverde brandstof uit biobrandstoffen te laten bestaan werd gehaald en in 2015 was dit aandeel verder gestegen tot 7%.

Naast het stijgende marktaandeel van biobrandstoffen zette de trend van verdieseling door. Aan het einde van 2015 bestond 53% van de geleverde brandstoffen voor het vervoer uit diesel tegenover een marktaandeel van 50% in 2000. Het aandeel van benzine daalde van 42% in 2000 naar 36% in 2015 en voor LPG van 8% naar 4%. De waterstof die gebruikt werd in de brandstofcellen vormde minder dan een procent van de totale hoeveelheid geleverde brandstoffen.

Samenvattend: Ondanks de verschillende maatregelen in de periode van 2005 tot 2015 namen de problemen in het regime verder toe wat betreft de omvang en de intensiteit. De congestie op het gehele wegennet werd groter ondanks de pogingen tot optimalisatie van de doorstroming op de snelwegen. In de steden nam niet alleen de bereikbaarheid af, door een toenemend aantal voertuigen, maar verminderde tevens de leefbaarheid door een toename van het aantal SUV-voertuigen. Op milieugebied werden de voertuigen op het gebied van gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissies weliswaar steeds schoner, maar het effect van maatregelen tegen klimaatveranderende emissie, stimuleren hybrides en biobrandstoffen, werd teniet gedaan door de groei van het wagenpark en de mobiliteit.

2015 - 2025: Stedelijke overheden zijn overlast SUV zat

Nicheontwikkelingen

De lokaal toenemende overlast van de SUV-voertuigen in de periode 2005 - 2015 creëerde een draagvlak onder de lokale overheid en de burgers om werende maatregelen te nemen tegen dit type voertuigen. SUV-voertuigen kenmerken zich door een groter ruimtebeslag ten opzichte van andere modellen. Dit leidde tot de introductie van een **variabel parkeertarief** afhankelijk van het ruimtebeslag van een voertuig. Voortbouwend op eerdere plannen om grotere voertuigen uit de stad te weren, ging Nijmegen in 2015 experimenteren met deze maatregel.

Door de goede ervaringen in het Phileasproject met **AVG** als vorm van Hoogwaardig Openbaar Vervoer in Eindhoven begonnen andere grote steden, in samenwerking met OV-bedrijven, onderzoeken of AVG op drukke lijnen ingezet konden worden. Vooral de

kosten om AVG in de stedelijke infrastructuur in te passen zorgde ervoor dat nauwelijks trajecten werden aangelegd. Eén van de grootste trajecten die aangelegd werd in deze periode was in Utrecht tussen het Centraal Station en de Uithof, omdat op dat traject met bussen onvoldoende capaciteit beschikbaar was om alle reizigers adequater te vervoeren. Als toevoeging aan andere AVG-trajecten werd op het terrein van de Uithof de interactie tussen AVG-voertuigen en normale voertuigen gedemonstreerd.

Met de toenemende congestie kwam langzaamaan de invoering van AVG-trajecten steeds meer onder de aandacht als de oplossing voor de fileproblemen. Alleen de invoering van AVG vereiste een grote financiële investering waar vanuit de politiek geen bereidheid toe was na de ervaringen met andere grote projecten aan het begin van de eeuw (zoals de hogesnelheidslijn en de Betuwelijn). Daarnaast had AVG zich nog steeds niet voldoende bewezen op het gebied van de interactie met het bestaande wegverkeer.

Aan het begin van deze periode vond nog onderzoek plaats naar verdere verbetering van **brandstofcelauto's**. Hierbij lag de aandacht op verdere verlaging van de productieprijs van brandstofcelauto's. In 2020 waren brandstofcelauto's voldoende technisch ontwikkeld om de concurrentie aan te gaan met de conventionele verbrandingsmotorauto. De prijs van een brandstofcel was gereduceerd van een factor tien duurder dan een verbrandingsmotor tot een factor anderhalf. De productieprijs van waterstof was competitief met fossiele brandstoffen en biobrandstoffen geworden. En met een brandstofcelauto was het mogelijk geworden om een vergelijkbare afstand af te leggen als met een conventionele auto.

Voordat de brandstofcelauto commercieel leverbaar werden werd het noodzakelijk geacht bij autofabrikanten om de prestaties van de auto's in de praktijk te demonstreren en de publieke reactie te meten. Vanwege goede ervaringen met de CUTE-demonstratieprojecten gingen autofabrikanten, de Europese Unie en verscheidene Europese steden samenwerken in het demonstratieproject CUTE3. Vanaf 2020 tot 2025 werden in dit project een deel van de taxivloot vervangen door brandstofcelauto's. Hierbij kregen verschillende autofabrikanten de mogelijkheid de prestaties van hun auto's te demonstreren onder verschillende omstandigheden. Daarnaast werd gekeken hoe op verschillende manieren een voor consumentenauto's toegankelijke waterstofinfrastructuur opgezet en / of uitgebreid kon worden. Belangrijke aspecten waarop de waterstofinfrastructuur getest werd waren kostenefficiëntie en veiligheid. Het demonstratieproject werd daarbij ondersteund door een grote mediacampagne, gefinancierd door overheid en industrie, om consumenten te informeren over het rijden in brandstofcelvoertuigen.

Hybrides waren aan het begin van 2020 voldoende doorgebroken in het regime om, mede door druk vanuit het sociotechnische landschap, een brede **klimaatheffing** te introduceren. Deze klimaatheffing verving het fiscale voordeel op hybrides. Inefficiënte voertuigen, met een lage energieklass (E of lager), kregen door de klimaatheffing vanaf 2020 een hogere verkoopprijs. Voor de meest efficiënte voertuigen, energieklass A of hoger, veranderde de verkoopprijs niet door de invoering van de klimaatheffing.

Om de klimaatverandering tegen te gaan kondigde de Europese Commissie voor 2030 **emissienormen voor klimaatveranderende stoffen** (CO₂ en CH₄) aan. Eén van de consequenties van deze emissienormen zou zijn dat voor conventionele auto's dure technologieën noodzakelijk werden om aan de eisen te kunnen voldoen. Hybrides hadden door hun hogere efficiëntie in brandstofverbruik minder problemen om aan de eerste normen te voldoen.

Regimeontwikkelingen

De in de voorgaande periode gemaakte verbeteringen om de **congestie** op het hoofdwegennet te verminderen waren nauwelijks succesvol doordat de rest van het wegennet niet in staat was de grotere doorstroming te verwerken. In de periode van 2015 - 2025 werd de infrastructuur in het geheel bekeken en zoveel mogelijk vertragende elementen in de doorstroming weggenomen. Daarnaast werd het rijden op spitsmomenten verder ontmoedigd door verhoging van de spitsheffing.

Aan het einde van 2025 was de gehele infrastructuur, en daarmee de doorstroming van het wegverkeer, zo goed als geoptimaliseerd. Maar naast de optimalisatie van de infrastructuur bleef de mobiliteit van mensen groeien. Deze groei werd net als afgelopen jaren gerealiseerd in het individuele vervoer. Aan het einde van 2025 nam de auto in de totale hoeveelheid reizigerskilometers 82% voor haar rekening (een stijging van 3% ten opzichte van 2015). Het aantal files nam verder toe en in de Randstad was er sprake van continue congestie gedurende de dag op de drukste snelwegen (A1, A2, A4, A12).

De auto zelf maakte in deze periode ook een aantal ontwikkelingen door met name op het gebied van assistentie door de centrale boordcomputer. In de periode tot 2015 was de boordcomputer steeds meer standaard onderdeel van de auto geworden als navigatiesysteem. Vanaf 2015 namen de mogelijkheden tot het ondersteunen van de bestuurder steeds verder toe. Onderweg konden reizigers geïnformeerd worden over geldende verkeersregels, bijvoorbeeld wanneer iemand te hard reed. Gekoppeld aan de cruise control werd de rijnsnelheid automatisch aangepast aan de geldende maximum snelheden voor de auto. De parkeersensoren in de auto werden ook op de weg ingezet om te controleren of er een veilige rijafstand ontstond. Desgewenst kon dit gekoppeld worden aan de cruise control systeem om automatisch de snelheid aan te passen aan de rijafstand. Een volgende stap in dit systeem was het ondersteunen van het rijden in de file door bij lage snelheden de afstand ten opzichte van een voorligger constant te houden. Naast deze systemen om de snelheden aan te passen ontstonden er ook systemen die het sturen in de auto gingen ondersteunen. Het begon met het controleren of er niet onverwacht van rijbaan gewisseld werd³. Indien zonder richting aan te geven van rijbaan gewisseld werd, werd de bestuurder gewaarschuwd. De volgende stap was het ondersteunen van de bestuurder bij het in het midden rijden van de rijbaan. Deze uitbreiding van de functionaliteit van de boordcomputer ging geleidelijk en werd ervaren als een verbetering van het comfort in de auto. Vooral reizigers die veelvuldig zich op de weg bevonden maakten graag gebruik van deze ondersteunden systemen en deze werden dan ook steeds meer standaard in nieuwe voertuigen.

Op het gebied van **bereikbaarheid en leefbaarheid** werd in steden het gebruik van grote voertuigen ontmoedigd door de introductie van variabele parkeertarieven. In Nijmegen resulteerde de maatregel in het geleidelijk afnemen van de overlast van de SUV-voertuigen waardoor andere steden deze maatregel ook gingen invoeren. Naast het positieve effect van de variabele parkeertarieven ontstond er een nieuw probleem door deze maatregel. Het effect van de variabele parkeertarieven was dat huishoudens een tweede compacte auto gingen aanschaffen, specifiek voor het rijden in de stad. De resulterende groei van het wagenpark leidde tegen het einde van de periode 2015 - 2025 tot steeds verder toenemende parkeerprobleem in de woonwijken.

De positieve ervaringen met brandstofcelbussen en waterstof in de grote steden zorgen ervoor dat middelgrote steden beginnen met de aanleg van een waterstofinfrastructuur.

³bijvoorbeeld doordat de bestuurder in slaap gevallen is

De toenemende verkoop van brandstofcelbussen, in grotere en kleinere steden, leidde tot schaalvoordeel en daling in de prijs van brandstofcelbussen. Hierdoor werd de financiële barrière voor andere steden, en de daar aanwezige OV-bedrijven, om over te stappen naar waterstoftechnologie kleiner. Het aandeel van het OV in de totale hoeveelheidreizigerskilometers daalde van 9% in 2015 naar 6% in 2025.

Op **milieugebied** werden de normen voor gezondheids- en luchtverontreinigende emissies verder aangescherpt waardoor het voor conventionele verbrandingsmotorvoertuigen noodzakelijk werd om duurdere add-on technologieën (filters, katalysatoren) te gebruiken. Dankzij hun hogere brandstofefficiëntie, en de daaraan gekoppelde lagere emissies, konden hybrides eenvoudig aan de normen te voldoen. In combinatie met de klimaatheffing bij aanschaf van een nieuw voertuig, en de stijgende brandstofprijzen, werd het steeds aantrekkelijker om een hybride aan te schaffen in plaats van een conventionele auto. De populariteit van hybrides nam toe en het schaalvoordeel in productie dat ontstond leidde tot een daling in de verkoopprijs van hybrides. In de jaarlijkse verkoop van auto's werd het hybride dominant wat zich vertaalde naar een aandeel van 32% in het totale wagenpark van 2025. Het aandeel van conventionele auto's in het totale wagenpark daalde naar 68%.

Om biobrandstoffen verder te stimuleren sprak de overheid met de brandstofleveranciers af dat in alle dieselvormen gemiddeld zes procent biodiesel te houden. In ruil daarvoor liet de overheid het accijnsvoordeel op biobrandstoffen bestaan. Er was onvoldoende animo onder brandstofleveranciers om pure biodiesel op de markt te brengen. Hiervoor waren twee oorzaken aan te wijzen. Ten eerste kon binnen Nederland onvoldoende biomassa geproduceerd worden om aan de brandstofvraag te kunnen voldoen. Andere EU-landen kampten met eenzelfde productieplafond waardoor importeren vanuit verder gelegen gebieden, zoals Afrika, nodig zou zijn, maar dit was vanuit financieel oogpunt onaantrekkelijk. De beperkte beschikbaarheid van biobrandstoffen binnen Europa zorgde ervoor dat de verkoopprijs langzaam begon te stijgen.

De waterstof, alleen nog gebruikt door collectieve vervoersmiddelen, werd met steun van verschillende overheden zoveel mogelijk uit duurzame bronnen geproduceerd waarbij met name groene stroom werd gebruikt. De waterstof werd aan het einde van 2025 voor 40% geproduceerd uit duurzame bronnen, voor 40% uit biomassa en voor 20% uit fossiele bronnen. Doordat de waterstof voornamelijk gebruikt werd voor OV-diensten was de verwachting dat deze verhoudingen tussen energiebronnen drastisch konden gaan veranderen naarmate de populariteit van brandstofcelauto's steeds verder toenam.

De naderende komst van brandstofcelauto's zorgde ervoor dat verschillende brandstofleveranciers gingen onderzoeken hoe ze via hun tankstations waterstof konden gaan aanbieden. Voor grote tankstations was het bijvoorbeeld rendabel om waterstof ter plekke te produceren, omdat dit kostenbesparing opleverde voor de distributie. Voor kleinere tankstations was het weer aantrekkelijk om de waterstof vanuit een productiecentrale aangeleverd te krijgen.

De toename van efficiëntere voertuigen, in combinatie met de biologische brandstoffen, in het wagenpark leidde tot langzame stabilisering in de vraag naar fossiele brandstoffen. De toenemende zorg, wegens schaarste in de voorraad goedkope ruwe olie, zorgde er alleen voor dat de olieprijs, en daarmee de brandstofprijs, verder bleef stijgen.

Het efficiënter worden van voertuigen en het stijgende aandeel biobrandstoffen in het wagenpark hadden een positief effect op de vermindering van emissies in het personenvervoer. Aan de andere kant stond een groeiend wagenpark die een groot deel van de ontwikkelingen ongedaan maakte. Het langzaam veranderende proces van het klimaat

leidde ertoe dat de gevolgen van een klimaatverandering steeds zichtbaarder werden. In Nederland begon de temperatuur langzaam toe te nemen en het neerslagpatroon te veranderen. Voor de agrarische sector was dit gunstig, omdat de productiemogelijkheden toenamen. Wereldwijd begonnen door de opwarming en het smelten van ijsgebieden, de zeespiegel merkbaar te stijgen.

Samenvattend: In de periode van 2015 - 2025 waren er verbeteringen zichtbaar in het personenvervoer, maar er ontstonden ook nieuwe problemen. De overlast van grotere voertuigen in de stad verminderde, maar vertaalde zich naar een groeiend wagenpark en het ontstaan van parkeerproblemen in de woonwijken. Op het wegennet verbeterde de doorstroming, maar desondanks nam de congestie toe door groeiende mobiliteit in de individuele vervoersmiddelen. Op het gebied van milieu ontstonden verbeteringen in de emissies, maar het groeiende wagenpark leidde netto nauwelijks tot veranderingen.

2025 - 2035: Waterstofauto's maken hun introductie in het regime

Nicheontwikkelingen

De steeds sterker zichtbaar wordende effecten van de klimaatverandering leidden tot extra druk vanuit het sociotechnische landschap om maatregelen te nemen. Vanuit de overheid werd daarom, naast de al aanwezige klimaatheffing bij aanschaf van een auto, een **klimaataccijns** op brandstoffen geïntroduceerd. De accijns was gekoppeld aan de mate van klimaatveranderende emissies die vrijkomen bij het gebruik van een brandstof in een voertuig. Benzine werd door deze maatregel het zwaarst belast, diesel werd afhankelijk van het aandeel biodiesel belast en waterstof niet.

Na afloop van het demonstratieproject CUTE3 met taxi's in steden bleek dat de brandstofcelauto's klaar waren om de concurrentie met de hybrides aan te gaan. Vanaf 2025 begonnen de brandstofcelauto's in het aanbod van autofabrikanten te verschijnen.

De toenemende congestie op het wegennet beperkte zich niet tot Nederland. In geheel Europa was er sprake van het steeds verder vastlopen van het wegennet. Vanuit de Europese Commissie werd daarom een demonstratieproject gefinancierd om **AVG-trajecten** op delen van Europese verbindingswegen in Nederland aan te leggen. Er werd begonnen om de bestaande betaalstroken langs de A2 tussen Utrecht en Amsterdam aan te passen voor AVG. In- en uitvoegmogelijkheden werden mogelijk gemaakt bij belangrijke verkeerspunten, zoals: Utrecht, Amsterdam en de kruising met de A9. Door de steeds verder uitbreidende functionaliteit van de boordcomputer in de auto was het vrij eenvoudig geworden om voertuigen geschikt te maken voor AVG. In eerste instantie werd de doelgroep gezocht in reizigers die veelvuldig gebruik hadden gemaakt van betaalstroken langs de A2. Deze reizigers, maar ook andere geïnteresseerde reizigers, konden aanspraak maken op een subsidieregeling voor de aanpassing van hun voertuig voor AVG.

Het in- en uitvoegen op een AVG-traject was zo eenvoudig mogelijk gemaakt. Tijdens het rijden werd de reiziger via de boordcomputer geïnformeerd over: een naderend AVG-traject, de reistijd via het AVG-traject in vergelijking met de 'normale' weg en de kosten om gebruik te maken van het AVG-traject. Als de automobilist gebruik wilde maken van het AVG-traject dan kon deze gaan rijden op de invoegstrook voor het AVG-traject. Op het moment dat het voertuig het AVG-traject ging verlaten werd de reiziger gewaarschuwd. De reiziger werd hierbij gevraagd om te reageren, zodat het duidelijk werd dat

deze klaar was om de besturing van het voertuig over te nemen. Indien de reiziger niet reageerde werd het voertuig stil gezet op een speciaal aangelegd parkeerterrein.

Regimeontwikkelingen

Om de **congestie** tegen te gaan in de periode van 2025 tot 2035 bestonden de maatregelen die de overheid nam hoofdzakelijk uit het intensiveren van de bestaande maatregelen, zoals het verder verhogen van de kilometer- en spitsheffing. Op de trajecten met de grootste congestie werd nog wel gekeken naar mogelijkheden om de infrastructuur aan te passen, maar hiervoor was nog nauwelijks ruimte beschikbaar. Het gevolg was dan ook dat de congestie verder verergerde. In de periode tot 2025 was nog slechts op enkele plaatsen sprake van congestie gedurende de dag. Aan het einde van 2035 waren grote delen van het wegennet vast komen te staan. De aanhoudende congestie leidde ertoe dat reizigers gingen overstappen naar openbare vervoersmiddelen om de files te vermijden. Het aandeel van de auto in de totale hoeveelheid reizigerskilometers daalde in 2035 naar 80%.

Ondanks dat de congestie verder toenam was er vanuit de Nederlandse politiek geen bereidheid om infrastructureel in te grijpen. Negatieve ervaringen met andere grote projecten in het verleden, zoals de Betuwelijn en de hoge snelheidslijn, vormde de basis voor de overheid om niet als enige partij in te willen grijpen in het verkeer en vervoer. Voor het bedrijfsleven was het onaantrekkelijk geworden om gevestigd te blijven in Nederland, en dan met name in de Randstad. De economische gevolgen van de congestie waren te groot en bedrijven gingen daarom verhuizen naar andere vestigingsplaatsen. Dit zorgde in de periode van 2025 - 2035 voor het ontstaan van een draagvlak onder burgers, bedrijven en politiek om drastische maatregelen tegen de congestie te nemen.

Op het gebied van **bereikbaarheid en leefbaarheid** gaf de toenemende vloot auto's steeds meer parkeerproblemen in de woonwijken van steden. Voor de lokale overheden was het wegens ruimtegebrek haast onmogelijk om het aantal parkeerplaatsen uit te breiden. Daarnaast zou uitbreiding van de parkeerplaatsen ten kostte gaan van groene zones en daarmee ten kostte van de leefbaarheid. Het gebrek aan parkeerplaatsen begon steeds meer tot zogenoemde wildparkeerders⁴ te leiden. Omdat dit ten kostte ging van de leefbaarheid en dan in het bijzonder de veiligheid⁵ besloten de lokale overheden om in te grijpen. De controle op het correct parkeren van de voertuigen werd vanuit de centra van de steden uitgebreid naar de woonwijken. Het wildparkeren werd zwaar gestraft met hoge boetes en wegsleepregelingen. Mensen die persé de zekerheid van een parkeerplaats voor de deur wilden konden bij de lokale overheden parkeerplaatsen gaan reserveren. Diegenen die dat niet deden werden door het strengere parkeerbeleid gedwongen de auto steeds verder van huis te parkeren.

Om de positieve trend van het verminderen van het aantal grote voertuigen in de stad verder te stimuleren gingen lokale overheden de parkeertarieven verder verhogen. Daarnaast werd gebruik gemaakt van smallere wegen om toegang tot delen van het centrum voor kleine voertuigen te versnellen. Grote voertuigen konden nog wel in die delen van het centrum komen, maar moesten daarvoor een stuk omrijden.

Tussen de grotere steden was er een beperkte waterstofinfrastructuur ontstaan. In combinatie met het schaalvoordeel werd het mogelijk voor kleinere gemeenten om ook brandstofcelbussen in hun gemeenten te stimuleren. Het bussenpark van OV-bedrijven bestond aan het einde van 2035 voor zestig procent uit brandstofcelbussen. Het aandeel

⁴ automobilisten die hun auto gewoon ergens neer dumpten waar ruimte was

⁵ Doordat de doorgang voor veiligheidsdiensten (brandweer, politie en ambulance) geblokkeerd worden

van het collectieve vervoer in de totale hoeveelheid reizigerskilometers steeg in deze periode van 6% in 2025 naar 8% in 2035.

Op **milieugebied** leidde de aanscherping van de gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissienormen in combinatie met de inwerkingtrede van de klimaatveranderende emissienormen tot een duurder productieproces voor conventionele auto's ten opzichte van hybrides en brandstofcelvoertuigen. De populariteit van conventionele auto's daalde sterk en dit leidde tot het langzaam verdwijnen van dit type voertuig uit het hoofdaanbod van autofabrikanten. De klimaatveranderende emissienormen zorgden ervoor dat hybrides ook add-on technologieën nodig hadden. Hybrides steden hierdoor in prijs en de concurrentiepositie van brandstofcelauto's verbeterde.

Aan het begin van 2025 kampte de brandstofcelauto nog met het probleem van een gebrekkige infrastructuur. Dit zorgde ervoor dat de verkoop van de brandstofcelauto iets langzamer opgang kwam dan gehoopt. In het begin waren de eerste eigenaren vooral de rijken en milieubewuste reizigers, die aangetrokken werden door het hightech karakter. Naarmate de vraag toenam begon schaalvoordeel te leiden tot het dalen van de prijs en het vergroten van de afzetmarkt. Het marktaandeel van brandstofcelvoertuigen was aan het einde van 2035 gestegen tot zes procent.

De hoge olieprijs en de stijgende prijs van biomassa maakte het onaantrekkelijk om waterstof uit deze twee energiebronnen te produceren. In plaats daarvan werd 60% van de totale waterstof geproduceerd uit alternatieve fossiele energiebronnen, zoals aardgas en kolen. Ongeveer 25% van de totale hoeveelheid geproduceerde waterstof werd uit duurzame bronnen geproduceerd en de resterende 15% uit biomassa. De hoge winstmarge van waterstofproductie uit fossiele bronnen ten opzichte van duurzame en biologische energiebronnen, deed het effect van de klimaataccijns op de pompprijs te niet. Brandstofleveranciers breidde hun duurzame waterstofproductie voornamelijk uit vanwege het publieke imago op het milieugebied.

De toenemende prijs van ruwe olie maakte het aantrekkelijker in combinatie met de klimaataccijns om het aandeel biobrandstoffen in mixdiesel te verhogen. Het werd zelfs aantrekkelijk om de biobrandstoffen van buiten Europa te gaan importeren. Dit zorgde ervoor dat de verhouding biobrandstoffen in mixdiesel verder verhoogd kon worden. De vraag naar fossiele brandstoffen nam hierdoor, in combinatie met de komst van de brandstofcelauto, in deze periode langzaam af waardoor de olieprijs langzaam begon te dalen.

Ondanks positieve ontwikkelingen in het regime blijven effecten van de klimaatverandering toenemen. Halverwege de periode (2030) bereikte de hybrides het hoogste jaarlijkse verkoopaandeel met ruim 95%. In 2035 was de jaarlijkse verkoop gedaald tot 88% door de komst van de brandstofcelauto en de hoog zijnde brandstofprijzen. Het totale wagenpark bestond in 2035 voor: 79% uit hybrides, 17% uit conventionele verbrandingsmotorvoertuigen en voor 4% uit brandstofcelauto's.

Samenvattend: In de periode van 2025 - 2035 nam voornamelijk de congestie verder toe. Dit resulteerde in een sterker wordende roep om drastische maatregelen te nemen. De succesvolle demonstratie van automatische voertuiggeleiding creëerde een draagvlak om de aangelegde trajecten verder uit te breiden. Op het gebied van leefbaarheid zette de positieve trend verder toe. De overlast van SUV-voertuigen nam verder af, maar de parkeerproblematiek bleef bestaan. Doordat mensen hun auto steeds verder weg moesten plaatsen nam het nut van een extra auto af. Op klimaatgebied waren de positieve ontwikkelingen nog steeds hoopvol, maar deze resulteerden niet in direct zichtbare effecten.

Vanuit de Europese overheid bleef daarom de druk aanwezig om verdere maatregelen te nemen.

2035 - 2050: Economische schade leidt tot aanleg automatische voertuiggeleiding

Het ontstane draagvlak om drastische maatregelen te nemen tegen de **congestie** leidde tot een lobby om het langs de A2 aangelegde AVG-traject verder uit te breiden. De overheid werd hierbij aangesproken op de grote inkomsten vanuit het verkeer en vervoer terwijl deze nauwelijks aangewend werden om de mobiliteit te verbeteren. AVG bood een goede perspectief om de tot stilstand rakende mobiliteit weer in beweging te brengen en te houden.

De kosten voor het aanpassen van de infrastructuur voor AVG werden niet alleen door de landelijke overheid gefinancierd. In Europa was congestie een algemeen probleem geworden, dus de Europese Commissie had er belang bij om op Europese verbindingswegen de doorstroming te garanderen. Op de verbindingswegen (zoals de A1, A2 en A12) werd dan ook de aanpassing van de infrastructuur gesubsidieerd, zodat er zodanig er één AVG-rijstrook ontstond over de gehele verbindingsweg. Daarnaast waren er nog diverse andere actoren bereid om te investeren in de aanleg van AVG-trajecten voornamelijk vanuit eigenbelang. Voor beroepsmatige reizigers, waarbij men veel onderweg is, was het aantrekkelijk om een betrouwbare reistijd te kunnen hebben tussen verschillende locaties. Daarnaast bood AVG de mogelijkheid om het principe van een rijdend kantoor verder uit te breiden. Voor rijkere en ander verkeer was AVG aantrekkelijk omdat het reizen comfortabeler werd en er mogelijkheden bestonden voor andere activiteiten. Tot slot was er nog een groep van actoren die mee wilden helpen met het exploiteren van de AVG-trajecten in de verwachting er winst mee te kunnen maken.

Het dekkingsgebied van AVG-trajecten begon zich steeds verder uit te breiden, zodat aan het einde van 2045 het grootste deel van hoofdwegenet over één of meerdere AVG-rijstroken beschikte. Het groeiende dekkingsgebied zorgde ervoor dat aan het einde van 2050 ongeveer dertig procent van het verkeer ervoor gekozen had om gebruik te maken van de AVG-stroken. De overstap van reizigers naar AVG-stroken leidde ook tot een verbetering van de doorstroming van de andere delen van de infrastructuur doordat een geringer aantal voertuigen zich op de overige stroken bevonden. Voor het eerst sinds 2005 was er een daling in de congestie merkbaar. Een bijeffect van de verbeterde doorstroming was dat het aantal individuele voertuigen weer begon te groeien, grotendeels ten kostte van het openbaar vervoer. In de periode 2035 tot 2050 steeg het aandeel van het individuele vervoer in de totale hoeveelheid reizigerskilometers naar 81% in 2050.

De lokale overheden veranderden in deze periode hun beleid ten aanzien van de **bereikbaarheid en leefbaarheid** nauwelijks meer. De actieve stimulering van brandstofcelbussen door de lokale overheden liep ten einde, omdat nagenoeg alle rijdende bussen brandstofcelbussen geworden waren. In een aantal gebieden werden de parkeertarieven verder verhoogd, maar dit leidde nauwelijks tot verdere veranderingen. Het aandeel van het openbaar vervoer in de totale hoeveelheid reizigerskilometers bedroeg in 2050 zeven procent.

Hoewel de situatie met bereikbaarheid en leefbaarheid nog steeds niet optimaal was, waren de lokale overheden in 2050 tevreden met wat ze bereikt hadden sinds 2005. De overlast van grotere voertuigen was sterk verminderd, door een shift naar kleinere voertuigen. Daarnaast waren de bussen in de steden schoner en stiller geworden door de

introductie van brandstofcel- en waterstoftechnologie.

Op **milieugebied** worden de gezondheidsbedreigende, luchtverontreinigende en klimaatveranderende emissienormen verder aangescherpt. Daarnaast werd de klimaatheffing en -accijns verder verhoogd. Het resultaat hiervan was dat voertuigen met verbrandingsmotor en fossiele brandstoffen als energiebron verder aan populariteit en marktaandeel verloren. De jaarlijkse verkoop van brandstofcelvoertuigen begonnen in deze periode dominant te worden ten opzichte van hybrides. Dit resulteerde erin dat aan het einde van 2050 ongeveer 47% van het wagenpark uit brandstofcelauto's bestond en voor de rest uit hybrides met 63%.

Door het steeds meer wegvallen van voertuigen die fossiele brandstoffen nodig hebben daalde de vraag naar ruwe olie. Dit resulteerde erin dat de olieprijs ging zakken en onder de prijs van geïmporteerde biodiesel kwam. Brandstofleveranciers kozen daarom ervoor om het aandeel fossiele brandstoffen in mixdiesel weer te vergroten.

De waterstof benodigd voor de brandstofcelvoertuigen werd nog steeds zoveel mogelijk uit kolen en aardgas geproduceerd. De toenemende vraag naar waterstof, in combinatie met de beperkte beschikbaarheid, zorgde ervoor dat de prijs van deze fossiele bronnen snel toenam. Waterstofproducenten gingen daarom langzaam over om meer duurzame bronnen te gebruiken in de productie. Eén van de belangrijkste nieuwe productietechnologieën die daarbij ingezet werd, naast de zon- en windenergie, was het nabootsen van het fotosynthese proces van planten. In 2050 werd dertig procent van de waterstof uit duurzame bronnen geproduceerd, vijftig procent uit fossiele bronnen en twintig procent uit biomassa.

Op het gebied van klimaatverandering waren de CO₂-emissies sinds 2000 gehalveerd. Er was een positieve verwachting dat deze reductie nog verder zou toenemen doordat brandstofcelvoertuigen steeds verder de markt gingen domineren en gemiddeld twee keer zo zuinig waren als de concurrerende hybrides.

Hoofdstuk 8

Scenario 2 - Een sturende overheid

1990 - 2005: Een personenvervoersysteem in de problemen

De voorgeschiedenis voor scenario 2 is hetzelfde als voor scenario 1 (zie bladzijdes 79 - 80).

2005 - 2015: Gebrek aan klimaatvriendelijke alternatieven

Nicheontwikkelingen

Ontwikkelingen en uitkomsten in de periode 1995 - 2005 maakten de weg vrij voor de stimulering van bepaalde technologische niches waarin doelgericht werd gezocht naar oplossingen voor de verschillende problemen van congestie, bereikbaarheid en leefbaarheid en milieu. Ook in de periode 2005 - 2015 bleven de ontwikkelingen in het regime bestaande en nieuwe niches voeden.

In steden begon de overlast van de auto steeds sterker toe te nemen op het gebied van bereikbaarheid en leefbaarheid. Het groeiende wagenpark en de groeiende mobiliteit van de Nederlander vertaalde zich in stedelijke congestie en parkeerproblemen. Het groeiende aandeel van SUV-voertuigen in het wagenpark was ook een doorn in het oog van steden, omdat dit type voertuig meer geluidsoverlast veroorzaakte, meer beslag legde op de beschikbare ruimte en, volgens studies uit de Verenigde Staten, de veiligheid in de stad verslechterde. In strijd tegen de overlast gingen de Nederlandse grote steden om zich heen kijken hoe andere internationale steden met deze problemen omgingen.

In Londen liep sinds 2003 een radicaal experiment met de **Congestion Charge**: reizigers konden met de auto het centrumgebied van Londen binnenrijden, maar daarvoor moesten ze een tolheffing van vijf Engelse pond betalen. De inkomsten uit de Congestion Charge werden, naast het bekostigen van de maatregel, aangewend om het openbaar vervoer en de leefbaarheid in de stad te verbeteren. Na afloop van het 1e jaar was het aantal voertuigen wat het centrum in wilde met 16% gedaald wat zich vertaalde in: 30% minder congestie, 20% minder ongelukken en de gemiddelde reistijd werd 14% korter. Het grootste deel van de reizigers, die normaal gesproken in de auto zaten, stapte over naar het openbaar vervoer binnen het centrumgebied. De overige reizigers gingen carpoolen, wandelen, fietsen of op de scooter verder in het centrum rijden. In de jaren na de introductie van de Congestion Charge bleef de overstap van auto naar OV doorzetten, zodat er gesproken kon worden van een modal shift.

Toen Londen in 2003 begon met de introductie van de Congestion Charge werd deze maatregel gezien als te radicaal om in andere steden te gaan invoeren. Belangrijkste reden

hiervoor was dat de overheid bezorgd was of er voldoende draagvlak was voor invoering van de maatregel, omdat de auto gezien werd als een heilige koe. Het aanhoudende effect van de Congestion Charge zorgde ervoor dat het verzet tegen de radicale maatregel begon te verdwijnen. In 2008 was de stad Rotterdam de overlast van de auto's zo zat dat ze besloot om ook een Congestion Charge vanaf 2010 te introduceren.

Sinds het einde van 2004 werd, met overheidssteun, in het Phileasproject een nieuwe vorm van hoogwaardig vervoer gedemonstreerd, namelijk automatisch geleide voertuigen. Tussen het centrum van Eindhoven en het nabijgelegen vliegveld reden elke tien minuten busdiensten op een aparte rijbaan. Doel van het project was om automatische voertuiggeleiding (AVG) in een openbaar toegankelijke toepassing te demonstreren en testen. Op lange termijn werd AVG als mogelijke oplossing gezien voor de congestie op het hoofdwegennet. Grootste barrières werden gevormd door de noodzakelijk investeringen om de infrastructuur aan te passen en AVG had zich nog niet bewezen ingepast in het bestaande verkeerssysteem.

In de strijd tegen de klimaatverandering was er druk vanaf het niveau van het sociotechnische landschap om klimaatvriendelijkere ontwikkelingen in het personenvervoer te stimuleren. Met de bestaande technologieën in het personenvervoer kon verbetering bereikt worden, maar dit werd als onvoldoende gezien om het probleem van klimaatverandering aan te pakken. Binnen het personenvervoer werden er nog geen reële alternatieven aanwezig geacht voor de verbrandingsmotorvoertuigen en de fossiele brandstoffen. Daarom stimuleerde de landelijke overheid op korte en lange termijn verschillende niches.

Hybrides werden sinds 2003 op de markt gebracht door Toyota en Honda. Door de dubbele aandrijving in hybrides waren deze relatief duur. Daartegenover stond dat de hybrides onder de zuinigste categorie auto's vielen. De overheid stimuleerde de aankoop van hybrides met fiscaal voordeel, in de vorm van een BPM-vrijstelling.

Biobrandstoffen, in de vorm van biodiesel, werden als alternatief voor fossiele brandstoffen gezien om klimaatneutrale brandstoffen te krijgen. Voor toepassingen in de auto moest een gebruiker alleen een aantal afdichtingen vervangen door biodieselbestendige. Biobrandstoffen werden vanaf 2006 als mengsel van biodiesel en fossiele diesel (mixdiesel) aangeboden bij de tankstations. De productie van biobrandstoffen werd zoveel mogelijk in Nederland gedaan. Boeren die hun inkomsten vanuit voedselproductie zagen dalen gingen biomassa produceren¹. Deze biomassa werd vervolgens verkocht aan brandstofproducenten als Shell en BP, die de biomassa omzette in biobrandstoffen. Over de gehele productieketen van biobrandstoffen was de productieprijs twee keer zo hoog ten opzichte van fossiele brandstoffen. De overheid stimuleerde de verkoop van biobrandstoffen door een accijnsvoordeel waardoor de pompprijs van mixdiesel gelijk was aan die van fossiele diesel.

Op de lange termijn werd **waterstoftechnologie** als de oplossing gezien voor het klimaatprobleem. Doordat de technologie nog onvoldoende ontwikkeld was werden onderzoek- en demonstratieprojecten rondom waterstoftechnologie gestimuleerd. Het onderzoek focuste zich op de belangrijkste barrières voor de introductie van waterstoftechnologie, namelijk: het verlagen van de kostprijs van brandstofcellen, de productieprijs van waterstof en de opslag van waterstof in individuele voertuigen.

Op het gebied van demonstratieprojecten liep tussen 2003 en 2006 het Clean Urban Transport for Europe (CUTE)-project met brandstofcelbussen in een negental Europese

¹De aanleg van agrarische gebieden voor biomassaproductie werd door de Nederlandse overheid financieel gesteund, omdat hiermee de afhankelijkheid in brandstoflevering afnam.

steden. Na afloop waren de verschillende betrokken partijen (steden, OV-bedrijven, industrie) zeer tevreden met de resultaten. De brandstofcelbussen bleken onder verschillende omstandigheden, even goed te presteren, als conventionele bussen met een verbrandingsmotor. Daarnaast waardeerden burgers en reizigers de lage geluidsemissies en de schone uitlaatgassen van de brandstofcelbussen. Het algemene beeld was dat deze technologie de leefbaarheid sterk zou kunnen bevorderen.

Omdat er nog onduidelijkheden waren over de lange termijnprestaties van de brandstofcelbussen en hoe de waterstofinfrastructuur uitgebreid kon worden, werd CUTE opgevolgd door CUTE2. In een looptijd van zes jaar werd gekeken hoe de bussen uit CUTE over een langere periode presteren. Daarnaast werden verschillende manieren onderzocht om de waterstofinfrastructuur uit te breiden, onder andere door het aantal deelnemende steden uit te breiden van negen naar veertig. In Nederland gingen naast Amsterdam nu ook Utrecht, Den Haag en Rotterdam deelnemen aan het demonstratieproject. Na afloop van CUTE2 hadden de brandstofcelbussen, zowel voor lokale overheden als busmaatschappijen, zich voldoende bewezen om over te gaan tot grootschalige stimulering en aanschaf.

Om commerciële toepassingen met waterstof mogelijk te maken werden in 2012 internationale richtlijnen afgesproken, waaronder veiligheidseisen voor toepassingen met waterstof. Daarnaast werden internationale plannen gemaakt om de introductie van waterstoftechnologie voor individueel vervoer zo soepel mogelijk te laten verlopen. Door de internationale richtlijnen werd de commercialisering van brandstofcelbussen bevorderd en ontstond een groeiend aandeel in de totale vervoersprestaties van het openbaar vervoer.

Regimeontwikkelingen

Om de **congestie** op het wegennet te verkleinen werd voornamelijk naar het hoofdwegennet (de snelwegen) gekeken. Voor uitbreiding van het wegennet was nog nauwelijks ruimte beschikbaar en het bracht veel kosten met zich mee. Daarom werd het wegennet zoveel mogelijk verbeterd door optimalisatie. Bij knelpunten werd gekeken hoe de infrastructuur aangepast kon worden om de doorstroming te verbeteren. Op drukke trajecten werd dynamische wegingdeling geïntroduceerd. Door een combinatie van smallere rijbanen en lagere snelheden werd het mogelijk om de wegcapaciteit op een veilige manier te vergroten.

Naast de optimalisatie van de infrastructuur werd in 2010 rekeningrijden ingevoerd. De wegenbelasting werd vervangen door een vast tarief per afgelegde kilometer, de zogenoemde kilometerheffing. Daarnaast werd een spitsheffing geïntroduceerd om het reizen op bepaalde plekken en tijdstippen te kunnen ontmoedigen. Op tijdstippen en plaatsen waar de spitsheffing werd ingevoerd resulteerde dit in een ontwijkend gedrag van reizigers. Of de reis werd voortgezet langs een andere route of op een ander tijdstip. Het resultaat hiervan was dat de spits zich uitsmeerde: de spitsperiode duurde langer, maar breidde zich uit naar omliggende wegen.

Door de observatiesystemen van het wegennet te verbeteren werd het mogelijk om een beter beeld te krijgen van actuele verkeerssituaties op het gehele wegennet. Dat maakte het mogelijk om sneller en adequater te reageren op verstoringen van de doorstroming op het wegennet. Daarnaast werden de observatiesystemen gekoppeld aan informatiesystemen om reizigers te informeren. Hierdoor werd het mogelijk om knelpunten te ontlasten door reizigers eromheen te leiden. Via borden boven de weg werden reizigers geïnformeerd over reistijden en eventuele snellere routes om knelpunten heen. Daarnaast gingen routepanners (via internet, maar ook in de auto) gebruik maken van dynamische verkeers-

informatie. Aan de hand van actuele verkeerssituaties werd het mogelijk om de snelste route naar een bestemming te bepalen.

De hiervoor genoemde maatregelen om de congestie te verbeteren leidden tot een betere doorstroming op het hoofdwegennet. Voor automobilisten was deze verbetering echter nauwelijks merkbaar, omdat het aantal auto's en de mobiliteit verder toenam. Voornamelijk in het individuele vervoer werd deze mobiliteitsgroei gerealiseerd. Het relatieve aandeel van individueel vervoer in het totale aantal reizigerskilometers steeg van 76% in 2005 naar 79% in 2015.

De verbeterde observatie van het wegennet bracht een nieuw probleem aan het licht. Zo werd zichtbaar dat de congestie zich niet beperkte tot de snelwegen, maar ook uitspreidde over de andere delen van het wegennet. De congestie buiten het hoofdwegennet nam verder toe door de focus van de landelijke overheid op het hoofdwegennet, en een toename in het aantal auto's en mobiliteit.

Lokale verkeer en vervoersregelaars zagen het openbaar vervoer als essentieel voor de doorstroming en verbeteringen in de **bereikbaarheid en leefbaarheid** in de steden en gemeenten. OV-bedrijven zetten zich zoveel mogelijk in om de kwaliteit van hun diensten te verbeteren. De betrouwbaarheid van bussen werd verbeterd in combinatie met betere informatievoorziening naar reizigers. Doordat OV-bedrijven waren geprivatiseerd werd het winstoogmerk een steeds belangrijker uitgangspunt en pogingen tot verbetering werden geconcentreerd op winstgevendende lijnen. Onrendabele lijnen werden zoveel mogelijk afgestoten om kosten te besparen en tarieven werden verder verhoogd. Ondanks alle veranderingen bleef het beeld van het OV onveranderd (te duur, tijdsinefficiënt, onbetrouwbaar en niet beschikbaar). Het totale aantal reizigerskilometers bleef ondanks alle veranderingen constant. Door de toename in het aantal reizigerskilometers in het individuele vervoer daalde het aandeel van het collectieve vervoer van 12% in 2005 naar 9% in 2015².

Vanwege de positieve bijdrage aan de leefbaarheid en de kwaliteit van het openbaar vervoer bleven de brandstofcellbussen na afloop van het CUTE2 project in de betrokken steden rijden. Hierbij kregen de OV-bedrijven financiële steun van lokale overheden. Afgeschreven conventionele bussen werden vrijwel alleen nog vervangen door brandstofcellbussen waardoor het aandeel gestaag groeide. Onder de bevolking in Amsterdam, Utrecht, Rotterdam en Den Haag werd deze ontwikkeling gewaardeerd en ontstond een gevoel dat de leefbaarheid aan het verbeteren was. Dit trok de aandacht van kleinere steden (bijvoorbeeld Groningen, Eindhoven en Enschede) en leidde tot onderzoek naar de mogelijkheid om waterstoftechnologie ook daar te introduceren.

Het groeiende wagenpark zorgde lokaal voor steeds meer overlast en het toenemende aantal voertuigen verslechterde de bereikbaarheid in de steden. Daarnaast werd de trend naar meer grotere voertuigen ook doorgezet. Dit had negatieve effecten op de leefbaarheid. Geluidsoverlast en ruimtebeslag namen toe terwijl gelijktijdig de verkeersveiligheid afnam. De overlast van de grotere voertuigen leidde bij zowel overheid als burgers tot het ontstaan van een draagvlak in de steden voor werende maatregelen.

De toenemende lokale problematiek leidde ertoe dat vanaf 2008 Rotterdam begon met de aanleg van de infrastructuur benodigd voor de Congestion Charge. Het centrumgebied tussen het Centraal Station en de Maas werd aan de rand van camera's voorzien voor de registratie van in- en uitrijdende voertuigen. Uit de camerabeelden werd, met behulp van ICT, automatisch het nummerbord van de voertuigen bepaald en gekoppeld aan de eigenaar van het voertuig. Vanaf 2010 was de benodigde technologie aangelegd en getest,

²De overige 12% in het totale reizigerskilometers wordt afgelegd lopend, fietsend, etc.

zodat de Congestion Charge van start kon gaan. Reizigers die het centrumgebied in wilden met de auto tussen 8.00 en 19.00 moesten daarvoor 5 euro gaan betalen³. De inkomsten van de Congestion Charge werden gebruikt om OV-diensten te verbeteren op gebieden van kwaliteit, betrouwbaarheid en servicegerichtheid. Dit werd onder andere bereikt door de voertuigen beter te onderhouden: beschadigingen zoals kapotte zittingen werden snel gerepareerd, bussen werden eerder vervangen dan gebruikelijk door brandstofcelbussen, etc. Daarnaast werd de infrastructuur aangepast, met aparte banen en gebieden, zodat OV-diensten hun route sneller, maar vooral betrouwbaarder in tijd konden afleggen. Deze aanpassingen zorgde er regelmatig ook voor dat auto's een omweg moesten maken om bij de bestemming te komen. Verder werd op straat het beeld aangepast zodat het er schoner en groener uit begon te zien.

Na vijf jaar van kracht te zijn kon in 2015 gezien worden dat de Congestion Charge eenzelfde effect als in Londen kreeg in Londen. Het aantal voertuigen dat het centrumgebied van Rotterdam in wilde daalde met 10%, wat zich vertaalde naar: 20% minder congestie, 15% minder ongelukken en een 10% kortere reistijd. Vanuit de Rotterdamse bevolking was aanvankelijk protest tegen de maatregel, omdat deze als de zoveelste poging van de overheid werd gezien om begrotingstekorten op te lossen over de rug van de automobilisten. Doordat Rotterdam zichtbaar investeerde, en dit ook meer deed dan andere grote steden, in het verbeteren van de stad en het openbaar vervoer verstomde de protesten.

De stad Rotterdam was zeer tevreden met de maatregel, omdat waar het in andere grote steden (zoals Amsterdam en Utrecht) slechter ging op gebieden van bereikbaarheid en leefbaarheid werd in Rotterdam juist een verbetering zichtbaar. Er werden dan ook plannen gemaakt om de Congestion Charge te verhogen in tarief en uit te breiden naar andere delen van de stad. Amsterdam, Utrecht en Den Haag begonnen de effecten van de Congestion Charge aandachtig te volgen en plannen te maken om ook in hun steden een soortgelijk systeem in te voeren.

Op **milieugebied** werden door de Europese Commissie de emissienormen voor gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissies (koolmonoxide, stikstofoxiden, vluchtige organische stoffen, zwaveldioxide en deeltjes) verder aangescherpt. Op het gebied van klimaatveranderende emissies argumenteerde de industrie dat er nog onvoldoende alternatieven op grote schaal beschikbaar waren. De overheid ging hier in mee en beperkte zich tot het stimuleren van het gebruik van biobrandstoffen en aanschaf van hybrides.

Doordat de olieprijs bleef stijgen, en daarmee de prijs van brandstoffen aan de pomp, werden energiezuinige voertuigen steeds aantrekkelijker voor de automobilist. Daarom, alsmede door het fiscale voordeel, wonnen hybrides snel in populariteit. De stijgende populariteit en verkoop van hybrides zorgden voor een schaalvoordeel en een dalende verkoopprijs. In de periode van 2005 tot 2015 steeg het aandeel van hybrides in de jaarlijkse verkoop van vrijwel nul tot 15%. Rond 2015 was het aandeel van hybrides in het totalenwagenvoertuigpark tot zes procent gestegen.

Omdat, door de stijgende olieprijs, de productiekosten van fossiele brandstoffen steeds verder toenamen konden biobrandstoffen steeds beter concurreren. Rond 2015 lagen de kosten voor de producent vrijwel gelijk, maar het accijnsvoordeel op biobrandstoffen maakten het voor automobilisten aantrekkelijker om aan de pomp mixdiesel te kopen. Het doel van de Europese Unie om in 2010 5,75% van de totale hoeveelheid geleverde

³Er waren, net zoals in Londen, een aantal uitzonderingsituaties: ambulances, politievoertuigen, brandweerwagens en OV-voertuigen werden vrijgesteld van de congestion charge. Bewoners van het centrumgebied kregen een korting van 80% op de tolheffing.

brandstof uit biobrandstoffen te laten bestaan werd gehaald en in 2015 was dit aandeel verder gestegen tot 7%.

Naast het stijgende marktaandeel van biobrandstoffen zette de trend van verdieseling door. Aan het einde van 2015 bestond 53% van de geleverde brandstoffen voor het vervoer uit diesel tegenover een marktaandeel van 50% in 2000. De aan het begin van de periode opgelaaide discussie over de uitstoot van kleine deeltjes bij dieselloertuigen nam af doordat aan het einde van 2015 roetfilters verplicht werden gesteld voor nieuwe dieselloertuigen. Het aandeel van benzine daalde van 42% in 2000 naar 36% in 2015 en voor LPG van 8% naar 4%. De waterstof die gebruikt werd in de brandstofcelbussen vormde minder dan een procent van de totale hoeveelheid geleverde brandstoffen.

Samenvattend: ondanks de verschillende maatregelen in de periode van 2005 tot 2015 namen de problemen in het regime verder toe wat betreft de omvang en de intensiteit. De congestie op het gehele wegennet werd groter ondanks de pogingen tot optimalisatie van de doorstroming op de snelwegen. In de steden nam niet alleen de bereikbaarheid af, door een toenemend aantal voertuigen, maar verminderde tevens de leefbaarheid door een toename van het aantal grotere voertuigen. Op milieugebied werden de voertuigen op het gebied van gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissies weliswaar steeds schoner, maar het effect van maatregelen tegen klimaatveranderende emissie, stimuleren hybridevoertuigen en biobrandstoffen, werd teniet gedaan door de groei van het wagenpark en de mobiliteit. De enige uitzondering op de groeiende problematiek was Rotterdam waar juist een vermindering in de problematiek zichtbaar werd door de Congestion Charge. Daarmee ging Rotterdam een voorbeeldfunctie vervullen voor stedelijk beleid in andere Nederlandse steden.

2015 - 2025: Congestion Charge als wapen in de strijd tegen de stijgende stedelijke overlast van auto's

Nicheontwikkelingen

De lokaal toenemende overlast van grotere voertuigen in de periode 2005 - 2015 creëerde een draagvlak onder de lokale overheid en de burgers om werende maatregelen te nemen tegen dit formaat voertuigen. Grotere voertuigen kenmerken zich door een groter ruimtebeslag ten opzichte van andere modellen. Dit leidde tot de introductie van een **variabel parkeertarief** afhankelijk van het ruimtebeslag van een voertuig. Voortbouwend op eerdere plannen om grotere voertuigen uit de stad te weren, ging Nijmegen in 2015 experimenteren met deze maatregel.

Door de goede ervaringen in het Phileasproject met **automatische voertuiggeleiding** (AVG) als vorm van Hoogwaardig Openbaar Vervoer in Eindhoven begonnen andere grote steden, in samenwerking met OV-bedrijven, onderzoeken of AVG op drukke trajecten ingezet kon worden.

Met de toenemende congestie kwam langzaam de invoering van AVG-trajecten steeds meer onder de aandacht als de oplossing voor de fileproblemen. Alleen de invoering van AVG vereiste een grote financiële investering voor aanpassing van de infrastructuur, waar vanuit de politiek geen bereidheid toe was na de negatieve ervaringen met andere grote projecten (zoals de hogesnelheidslijn en de Betuwelijn). Daarnaast had AVG zich nog steeds niet voldoende bewezen op het gebied van de interactie met het bestaande wegverkeer.

Aan het begin van deze periode vond nog onderzoek plaats naar verdere verbetering van **brandstofcelauto's**. Hierbij lag de aandacht op verdere verlaging van de productieprijs. De prijs van een brandstofcel was gereduceerd van een factor tien duurder dan een verbrandingsmotor tot een factor anderhalf. De productieprijs van waterstof was competitief met fossiele brandstoffen en biobrandstoffen geworden. En met een brandstofcelauto was het mogelijk geworden om een vergelijkbare afstand af te leggen als met een conventionele auto.

Voordat de brandstofcelauto commercieel leverbaar werden werd het noodzakelijk geacht bij autofabrikanten om de prestaties van de auto's in de praktijk te demonstreren en de publieke reactie te meten. Vanwege goede ervaringen met de CUTE-demonstratieprojecten gingen autofabrikanten, de Europese Unie en verscheidene Europese steden samenwerken in het demonstratieproject CUTE3⁴. Vanaf 2020 tot 2025 werden in dit project een deel van de taxivloot vervangen door brandstofcelauto's. Hierbij kregen verschillende autofabrikanten de mogelijkheid de prestaties van hun auto's te demonstreren onder verschillende omstandigheden. Daarnaast werd gekeken hoe op verschillende manieren een voor consumentenauto's toegankelijke waterstofinfrastructuur opgezet en / of uitgebreid kon worden. Belangrijke aspecten waarop de waterstofinfrastructuur getest werd waren kostenefficiëntie en veiligheid. Het demonstratieproject werd daarbij ondersteund door een grote mediacampagne om consumenten te informeren over het rijden in brandstofcelvoertuigen.

Vanuit het oogpunt van duurzaamheid wilde de overheid zorgen dat waterstof zo milieuvriendelijke geproduceerd zou worden en niet uit de goedkope fossiele brandstoffen. Daarnaast wilde de overheid minder afhankelijk zijn in de brandstofvoorziening van andere landen. Daarom werd vanaf 2025 een **CO₂-heffing** ingevoerd. Afhankelijk van de mate van kooldioxide die vrijkomt bij de productie van waterstof moesten waterstofproducenten een extra heffing gaan betalen. Voor de waterstofproductie was het hiermee aantrekkelijker geworden om te produceren vanuit duurzame bronnen (zon, water, wind) dan uit biomassa, welke weer aantrekkelijker was dan de fossiele bronnen. Verwachting van deze maatregel was dat de pomprijs van brandstoffen door marktwerking niet of nauwelijks beïnvloed zou worden.

Hybrides waren aan het begin van 2020 voldoende doorgebroken in het regime om, mede door druk vanuit het sociotechnische landschap, een **klimaatheffing** te introduceren. Deze klimaatheffing verving het fiscale voordeel op hybrides. Inefficiënte voertuigen, met een lage energieklass (E of lager), kregen door de klimaatheffing vanaf 2020 een hogere verkoopprijs. Voor de meest efficiënte voertuigen, energieklass A of hoger, veranderde de verkoopprijs niet door de invoering van de klimaatheffing.

Om de klimaatverandering tegen te gaan kondigde de Europese Commissie voor 2030 **normen voor emissies van klimaatveranderende stoffen** (CO₂ en CH₄) aan. Eén van de consequenties van deze emissienormen zou zijn dat voor conventionele auto's dure technologieën noodzakelijk werden om aan de eisen te kunnen voldoen. Hybrides hadden door hun hogere efficiëntie in brandstofverbruik minder problemen om aan de eerste normen te voldoen.

⁴Brandstofcelvoertuigen zijn anders dan verbrandingsmotorvoertuigen in gebruik en gedrag. Daarom was het noodzakelijk om consumenten te laten wennen aan aspecten als: geluidsproductie, reactie bij indrukken gaspedaal, etc.

Regimeontwikkelingen

De in de voorgaande periode gemaakte verbeteringen om de **congestie** te verminderen en de doorstroming op het hoofdwegennet te verbeteren waren nauwelijks succesvol doordat de rest van het wegennet niet in staat was de grotere doorstroming te verwerken. In de periode van 2015 - 2025 werd de infrastructuur in het geheel bekeken en zoveel mogelijk vertragende elementen in de doorstroming weggenomen. Daarnaast werd het rijden op spitsmomenten verder ontmoedigd door verhoging van de spitsheffing.

Aan het einde van 2025 was de gehele infrastructuur, en daarmee de doorstroming van het wegverkeer, zo goed als geoptimaliseerd. Maar naast de optimalisatie van de infrastructuur bleef de mobiliteit van mensen groeien. De vervoersprestaties van het openbaar vervoer in totale reizigerskilometers bleven constant ten opzichte van voorgaande jaren. De groeiende mobiliteit werd daarom voornamelijk in het individuele vervoer gerealiseerd. Het aantal files nam verder toe en in de Randstad was er sprake van continue congestie gedurende de dag op de drukste snelwegen (A1, A2, A4, A12).

Op het gebied van **bereikbaarheid en leefbaarheid** werden in Rotterdam door de Congestion Charge verbeteringen zichtbaar. Om het effect van de Congestion Charge te vergroten ging Rotterdam in 2020 het tarief gelijk trekken aan Londen wat betekende een verhoging van vijf naar vijftien euro. Daarnaast werd het gebied waar de Congestion Charge gold verder uitgebreid, die afgebakend werd met de al aan het eind van de twintigste eeuw aangelegde transferia. De verhoging en het uitbreiden van het Congestion Charge-gebied leidde tot een verdere terugdringing van het individuele vervoer met 10%. De inkomsten uit de Congestion Charge werden in deze periode verder aangewend om het OV te verbeteren. Overbelaste trajecten werden aangepast voor AVG, naar voorbeeld van het Phileasproject in Eindhoven. Daarnaast werd geld gereserveerd voor subsidiering van particuliere initiatieven die een bijdrage zouden kunnen leveren aan het verbeteren van de bereikbaarheid en leefbaarheid. Onder Rotterdamse bewoners die hoofdzakelijk binnen Rotterdam reisden ontstond een trend om de auto maar thuis te laten. Het OV was goedkoper geworden, maar ook sneller en betrouwbaarder. Een belangrijke barrière van het OV werd weggenomen, namelijk die van het ongemakkelijk meenemen van boodschappen in het OV. Winkeliers organiseerden een bezorgservice voor de goederen, met steun van de Rotterdamse overheid, zodat het reizen in het OV comfortabeler werd. Daarnaast werd een car-on-demand systeem ontwikkeld. Indien iemand een auto nodig had, dan kon deze besteld worden en binnen vijftien minuten was deze dan ter plaatse.

De drie andere grote steden (Amsterdam, Den Haag, Utrecht) gingen, vanwege het onvoldoende effect hebben van het eigen beleid en het succes van Rotterdam met de Congestion Charge, in 2020 ook beginnen met de invoering van deze maatregel. Er werd hierbij gekozen voor een heffing variërende tussen tien en vijftien euro. Evenals Londen en Rotterdam werd ervoor gekozen om zichtbare verbeteringen door te voeren in het OV en de leefbaarheid van de stad.

De introductie van variabele parkeertarieven ontmoedigde automobilisten om grote voertuigen in de stad te brengen. In Nijmegen resulteerde de maatregel in het geleidelijk afnemen van de overlast van de grotere voertuigen en daaraan gekoppeld een verbetering in de leefbaarheid en bereikbaarheid. Vanwege de positieve ervaringen van Nijmegen gingen ook andere steden deze maatregel invoeren. Naast het positieve effect van de variabele parkeertarieven ontstond er een nieuw probleem door deze maatregel in de steden zonder Congestion Charge. Het effect van de variabele parkeertarieven was dat huishoudens een tweede compacte auto gingen aanschaffen, specifiek voor het rijden in de stad. De resulterende groei van het wagenpark leidde tegen het einde van de periode 2015 - 2025 tot

steeds verder toenemende parkeerprobleem in de woonwijken. In steden met Congestion Charge vormde het variabele parkeertarief een extra stimulans om voor het OV te kiezen.

De positieve ervaringen met brandstofcelbussen en waterstof in de grote steden zorgden ervoor dat middelgrote steden begonnen met de aanleg van een waterstofinfrastructuur. De toenemende verkoop, in grotere en middelgrote steden, leidde tot schaalvoordeel en daling in de prijs van de brandstofcelbussen. Hierdoor werd de financiële barrière voor andere steden, en de daar aanwezige OV-bedrijven, om over te stappen naar waterstoftechnologie kleiner.

Op **milieugebied** maakte het aanscherpen van de normen voor gezondheids- en luchtverontreinigende emissies het noodzakelijk voor conventionele verbrandingsmotorvoertuigen om duurdere add-on technologieën (filters, katalysatoren) te gebruiken. Dankzij hun hogere brandstofefficiëntie, en de daaraan gekoppelde lagere emissies, konden hybrides eenvoudig aan de normen te voldoen. In combinatie met de klimaatheffing bij aanschaf van een nieuw voertuig, en de stijgende brandstofprijzen, werd het steeds aantrekkelijker om een hybridevoertuig aan te schaffen in plaats van een conventionele auto. De populariteit van hybrides nam toe en het schaalvoordeel in productie dat ontstond leidde tot een daling in de verkoopprijs van hybrides. In de jaarlijkse verkoop van auto's werd het hybridevoertuig dominant wat zich vertaalde naar een aandeel van 32% in het totale wagenpark in 2025.

Om biobrandstoffen verder te stimuleren sprak de overheid met de brandstofleveranciers af dat in alle dieselvormen gemiddeld tien procent biodiesel te houden. In ruil daarvoor liet de overheid het accijnsvoordeel op biobrandstoffen bestaan. Er was onvoldoende animo onder brandstofleveranciers om pure biodiesel op de markt te brengen. Hiervoor waren twee oorzaken aan te wijzen. Ten eerste kon binnen Nederland onvoldoende biomassa geproduceerd worden om aan de brandstofvraag te kunnen voldoen. Andere EU-landen kampten met eenzelfde productieplafond waardoor importeren vanuit verder gelegen gebieden, zoals Afrika, nodig zou zijn, maar dit was vanuit financieel oogpunt onaantrekkelijk. De beperkte beschikbaarheid van biobrandstoffen binnen Europa zorgde ervoor dat de verkoopprijs langzaam begon te stijgen.

De waterstof, vooral gebruikt door collectieve vervoersmiddelen, werd met steun van verschillende overheden zoveel mogelijk uit duurzame bronnen geproduceerd. De naderende komst van brandstofcelauto's zorgde ervoor dat verschillende brandstofleveranciers gingen onderzoeken hoe ze via hun tankstations waterstof konden gaan aanbieden. Voor grote tankstations was het rendabel om waterstof ter plekke te produceren, omdat dit kostenbesparing opleverde voor de distributie. Voor kleinere tankstations was het weer aantrekkelijk om de waterstof vanuit een centrale productie-eenheid aangeleverd te krijgen.

Vanwege de CO₂-heffing op de productie van waterstof gingen producenten zich focussen op het raadplegen van klimaatvriendelijke energiebronnen. Naast de duurzame en biologische bronnen werd nog steeds gekeken naar manieren om fossiele bronnen te kunnen gebruiken, omdat deze qua productieprijs veel goedkoper waren. Om de CO₂-heffing zo laag mogelijk te houden werd er gekeken naar optimalisatie en add-on technieken om de emissies bij de productie met fossiele bronnen kostenaantrekkelijk zo laag mogelijk te houden.

De toename van efficiëntere voertuigen, in combinatie met de biologische brandstoffen, in het wagenpark leidde tot langzame stabilisering in de vraag naar fossiele brandstoffen. De toenemende zorg, wegens schaarste in de voorraad goedkope ruwe olie, zorgde er voor dat de olieprijs, en daarmee de brandstofprijs, verder bleef stijgen.

Het efficiënter worden van voertuigen en het stijgende aandeel biobrandstoffen in het wagenpark hadden een positief effect op de vermindering van emissies in het personenvervoer. Aan de andere kant stond een groeiend wagenpark wat een groot deel van de ontwikkelingen ongedaan maakte. Het langzaam veranderende proces van het klimaat leidde ertoe dat de gevolgen van een klimaatverandering steeds zichtbaarder werden. In Nederland begon de gemiddelde temperatuur langzaam toe te nemen en het neerslagpatroon te veranderen. Voor de agrarische sector was dit gunstig, omdat de productiemogelijkheden toenamen. Wereldwijd begon door de opwarming en het smelten van ijsgebieden, de zeespiegel merkbaar te stijgen.

Samenvattend: In de periode van 2015 - 2025 waren er verbeteringen zichtbaar in het personenvervoer, maar er ontstonden ook nieuwe problemen. In de steden met Congestion Charge nam de bereikbaarheid en leefbaarheid toe. Daarbuiten nam, door het strengere parkeerbeleid, de overlast van grotere voertuigen in de stad af, maar vertaalde zich naar een groeiend wagenpark en het ontstaan van parkeerproblemen in de woonwijken. Op het wegennet verbeterde de doorstroming, maar desondanks nam de congestie verder toe, wat werd veroorzaakt door groeiende mobiliteit in individuele vervoersmiddelen. Op het gebied van milieu verbeterde de emissieniveaus, maar netto leidde dit nauwelijks tot veranderingen door het groeiende wagenpark.

2025 - 2035: Klimaatvriendelijke brandstoffen worden belangrijk

Nicheontwikkelingen

Na afloop van het demonstratieproject CUTE3 met taxi's in steden bleek dat de **brandstofcelauto's** klaar waren om de concurrentie met de hybrides aan te gaan. Vanaf 2025 begonnen de brandstofcelauto's in het aanbod van autofabrikanten te verschijnen.

Regimeontwikkelingen

Om de **congestie** tegen te gaan in de periode van 2025 tot 2035 bestonden de maatregelen die de overheid nam aanvankelijk uit het intensiveren van de bestaande maatregelen, zoals het verder verhogen van de kilometer- en spitsheffing. Op de trajecten met de grootste congestie werd nog wel gekeken naar mogelijkheden om de infrastructuur aan te passen, maar hiervoor was nog nauwelijks ruimte beschikbaar. De verwachting bij verkeersanalisten was dan ook dat de congestie verder zou toenemen.

Gedurende de periode 2025 - 2035 begon zich in de Randstad een modal shift af te tekenen. Reizigers uit de vier grote steden begonnen er namelijk steeds meer gewend aan te raken om binnen de eigen stad met het OV te reizen in plaats van met de auto. Binnen de steden was het OV dusdanig verbeterd dat er goede aansluitingen waren op de interstedelijke treinverbindingen. In combinatie met de stijgende brandstofkosten en de aanhoudende congestie was de drempel om tussen de steden met het OV te gaan reizen dusdanig klein geworden, dat mensen hun reisgedrag gingen veranderen.

Toen de landelijke overheid deze modal shift herkende werd besloten om deze verder te stimuleren. Dit werd gedaan door de spitsheffing in de Randstad sterk te verhogen. De extra inkomsten uit de spitsheffing werden vervolgens geïnvesteerd in het opknappen van de interstedelijke OV-verbindingen. Het aantal mensen die het OV ging gebruiken voor het reizen binnen de Randstad nam verder toe. Buiten de Randstad vormde de auto nog een belangrijke vorm van vervoer, maar daar was de congestieproblematiek minder sterk.

Het aandeel van de auto in de totale hoeveelheid reizigerskilometers daalde in de periode 2025 - 2035 van 79% naar 73%.

Op het gebied van **bereikbaarheid en leefbaarheid** begonnen naast de grote steden nu ook middelgrote steden met de invoering van een Congestion Charge. Reizigers worden hierdoor nog meer gestimuleerd om, met name binnen de Randstad, hun reizen via het OV te laten plaatsvinden. Het aandeel van het openbaar vervoer steeg in deze periode tot 15% in 2015.

De parkeerproblemen die in de woonwijken ontstonden door de grote aantallen tweede auto's konden niet opgelost worden door het uitbreiden van de parkeerruimte. Aan het begin van de periode gingen lokale overheden in woonwijken streng controleren op het goed parkeren van de voertuigen. In de loop van de periode begon het parkeerprobleem in de stadscentra dankzij de Congestion Charge langzaam af te nemen. Doordat reizen met de auto in de steden niet meer kostenaantrekkelijk was, verdween het nut van een extra auto voor het reizen in de stad. Steeds meer mensen lieten hun auto dan ook thuis staan, om deze dan ook uiteindelijk weg te doen. De parkeerproblemen in de woonwijken begonnen hierdoor af te nemen.

Om de nog in steden rijdende voertuigen verder uit te stad te weren werden de parkeertarieven verder gedifferentieerd. Daarnaast werd de infrastructuur van de steden aangepast. Snelle routes naar de stadscentra werden versmald zodat grotere auto's moesten omrijden om in het centrum te komen.

Tussen de grotere steden was er een beperkte waterstofinfrastructuur ontstaan. In combinatie met het schaalvoordeel werd het mogelijk voor kleinere gemeenten om ook brandstofcelbussen in hun gemeenten te stimuleren. Daarnaast stimuleerden lokale overheden in grote steden OV-bedrijven om hun normale bussen sneller te vervangen door brandstofcelbussen, vanwege de positieve bijdrage aan de leefbaarheid. Het bussenpark bestond aan het einde van 2035 voor 80% uit brandstofcelbussen.

Op **milieugebied** leidde de aanscherping van de normen voor gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissies in combinatie met de inwerkingtrede van de normen voor klimaatveranderende emissies tot een duurder productieproces voor conventionele auto's ten opzichte van hybrides en brandstofcelvoertuigen. De populariteit van conventionele auto's daalde sterk en dit leidde tot het langzaam verdwijnen van dit type voertuig uit het hoofdaanbod van autofabrikanten. De normen voor klimaatveranderende emissies leidde ertoe dat hybrides ook add-on technologieën nodig hadden. De verkoopprijs van hybrides nam hierdoor toe waardoor het aantrekkelijker werd om een brandstofcelauto in plaats van een hybride te kopen.

De steeds sterker zichtbaar wordende effecten van de klimaatverandering leidden tot extra druk vanuit het sociotechnische landschap om maatregelen te nemen. Vanuit de overheid werd daarom, naast de al aanwezige klimaatheffing bij aanschaf van een auto, een klimaataccijns op brandstoffen geïntroduceerd. De accijns was gekoppeld aan de mate van klimaatveranderende emissies die vrijkomen bij het gebruik van een brandstof in een voertuig. Benzine werd door deze maatregel het zwaarst belast, diesel werd afhankelijk van het aandeel biodiesel belast en waterstof niet.

In 2025 kampte de brandstofcelauto nog met het probleem van een gebrekkige infrastructuur. Daarnaast werd het gebruik van de auto in steden en in de Randstad steeds duurder waardoor de algehele autoverkoop en -bezit daalde. Dit zorgde ervoor dat de verkoop van de brandstofcelauto langzamer opgang kwam dan gehoopt was bij de autofabrikanten. In het begin waren de eerste eigenaren vooral de rijken die aangetrokken

werden door het hightech karakter. Naarmate de vraag toenam begon schaalvoordeel te leiden tot het dalen van de prijs en het vergroten van de afzetmarkt. Het marktaandeel van brandstofcelvoertuigen was aan het einde van 2035 gestegen tot zes procent.

De hoge olieprijs in combinatie met de CO₂-heffing voor waterstofproducenten maakte het onaantrekkelijk om waterstof uit deze energiebron te produceren. In combinatie met de CO₂-heffing en klimaataccijns was het aantrekkelijker om als energiebron biomassa te importeren vanuit Afrika en Azië⁵. Daarnaast werd verder geïnvesteerd in het gebruiken van duurzame energiebronnen. Dit leidde ertoe dat in 2035 waterstof voor 45% uit biomassa werd geproduceerd, voor 30% uit duurzame bronnen en voor 25% uit fossiele bronnen (vooral kolen en gas). Brandstofleveranciers gingen ook adverteren met de mate van milieuvriendelijkheid van hun brandstoffen in de hoop daarmee meer klanten te kunnen trekken.

De toenemende prijs van ruwe olie maakte het aantrekkelijker, in combinatie met de klimaataccijns, om het aandeel biobrandstoffen in mixdiesel te verhogen. Het werd zelfs aantrekkelijk om de biobrandstoffen van buiten Europa te gaan importeren. Dit zorgde ervoor dat de verhouding biobrandstoffen in mixdiesel verder verhoogd kon worden. De vraag naar fossiele brandstoffen nam hierdoor, in combinatie met de komst van de brandstofcelauto, in deze periode langzaam af waardoor de olieprijs langzaam begon te dalen.

Ondanks positieve ontwikkelingen in het regime bleven de negatieve effecten van de klimaatverandering toenemen. In het wagenpark begon het aantal voertuigen af te nemen door een dalende nuttig. Door de dalende nuttigheid namen de verkoopcijfers van nieuwe auto's af, omdat voor de enkele ritten die nog gemaakt werden het huidige voertuig wel voldeed. Dit leidde ertoe dat het totale wagenpark in 2035 voor 57% bestond uit hybrides, 39% uit conventionele verbrandingsmotorvoertuigen en voor 4% uit brandstofcelauto's.

Samenvattend: In de periode van 2025 - 2035 traden er veranderingen op in het reizigersgedrag welke leidden tot positieve effecten. De congestie in de Randstad verminderte door een afname in auto's. De bereikbaarheid en leefbaarheid verbeterde lokaal doordat meer mensen het openbaar vervoer gingen gebruiken. Op milieugebied bleven de negatieve effecten van de klimaatverandering toenemen.

2035 - 2050: Het ontstaan van een landelijke modal shift

De **congestie** in de Randstad nam in de periode 2035 - 2050 verder af. Om te voorkomen dat mensen weer teruggingen naar het reizen met de auto werden de spitsheffing en kilometerheffing verhoogd. Binnen de Randstad werd het steeds gebruikelijker om OV-diensten te gebruiken voor het reizen. Buiten de Randstad was er nog nauwelijks sprake van een Modal Shift, maar de doorstroming op de hoofdwegen was daar nog goed en vormde geen aanleiding voor het nemen van maatregelen. Het aandeel van het individuele vervoer in de totale reizigerskilometers daalde in deze periode verder tot 66% in 2050.

Binnen de steden was de **bereikbaarheid en leefbaarheid** enorm verbeterd door de Congestion Charge. De meeste mensen kozen ervoor om gebruik te maken van OV-diensten in plaats van de auto. Het aandeel OV in het totale aantal reizigerskilometers steeg in 2050 tot 22%. De grotere voertuigen die aan het begin van 2005 tot steeds grotere

⁵ Aardgas was op zich ook aantrekkelijk als energiebron, maar had het nadeel dat de marktprijs was gekoppeld aan de ruwe olieprijs

ergernissen begonnen te leiden bij lokale overheden werden alleen nog gebruikt voor grote afstanden.

Op **milieugebied** werden de emissienormen verder aangescherpt en de diverse heffingen verhoogd om het personenvervoer nog schoner te maken. Door deze maatregelen werd het duurder om een conventionele auto of een hybride te bezitten en aan te schaffen. De toename in het OV-gebruik leidde tot een afname in de verkoop van auto's. Aan het einde van 2050 bestond het wagenpark voor 10% uit conventionele verbrandingsmotorvoertuigen, voor 50% uit hybrides en voor 40% uit brandstofcelvoertuigen.

De CO₂-heffing op de waterstofproductie werd verder verhoogd om te zorgen dat de productie meer milieuvriendelijk zou worden. Voor waterstof betekende dit dat ongeveer 35% uit duurzame bronnen geproduceerd werd, 50% uit biologische bronnen en 25% uit fossiele bronnen. De dalende vraag naar fossiele bronnen zorgde voor een dalende prijs. Om te voorkomen dat daardoor het brandstofaandeel van fossiele bronnen weer zou toenemen verhoogde de overheid de CO₂-heffing en de klimaataccijns verder.

Door het kleiner worden van het wagenpark en de steeds milieuvriendelijker wordende voertuigen en brandstoffen werden de emissies van klimaatveranderende emissies sinds 2005 met 80% verminderd. Er was een positieve verwachting dat deze reductie nog verder zou toenemen naarmate de modal shift zich verder zou uitbreiden en het resterende wagenpark meer en meer overging op brandstofcelvoertuigen.

Hoofdstuk 9

Analyse en Reflectie

Dit laatste hoofdstuk bevat een kritische analyse van en reflectie op de beantwoording van de hoofdvraag van dit onderzoek: *Hoe kan de methode van Sociotechnische Scenario's ingezet worden om beleidsadviezen te formuleren voor een transitie naar een optimaal duurzame inzet van waterstoftechnologie in het personenvervoer?* Met als deelvragen:

- Hoe kan de STSc methode gebruikt worden om contrasterende transitiepaden te verkennen voor het personenvervoer met een focus op een concrete case, te weten waterstof?
- Kunnen op basis van de met STSc gemaakte verkenningen aanbevelingen voor beleid worden gedaan? Zo ja, welke aanbevelingen kunnen gedaan worden?
- Elzen et al. [2002] gaven aan dat de STSc-methode nog niet optimaal is. Welke suggesties voor verandering en verbetering van de methodiek kunnen er gedaan worden?

Paragraaf 9.1 start met een analyse van de uitkomsten op basis van verschillende duurzaamheidsaspecten. Uit deze vergelijking volgt een conclusie welk scenario een meer duurzame vorm van mobiliteit biedt. In de analyse worden de buigpunten in de scenario's, of de kiem van waaruit de uitkomsten ontstaan zijn, opgezocht. De gevonden buigpunten in de analyse worden in paragraaf 9.2 gebruikt om beleidsadviezen te formuleren.

In paragraaf 9.3 vindt een filosofische reflectie plaats met behulp van de monstertheorie van Martijntje Smits. De monstertheorie verklaart waarom waterstof de potentie heeft om tot een monster uit te groeien: een technologie die gelijktijdig fascinerend en afschrikwekkend kan zijn. Met behulp van deze theorie wordt tevens aangegeven hoe in de praktijk met monsters omgegaan kan worden. De verkregen inzichten worden vervolgens gebruikt om de gemaakte beleidsadviezen aan te scherpen.

In paragraaf 9.4 worden de geformuleerde beleidsadviezen naast het beleid van de Nederlandse overheid neergelegd. Op basis van het overheidsbeleid, zoals beschreven in de Nota Mobiliteit uit 2004, wordt geanalyseerd waar verbeteringen in het beleid kunnen worden doorgevoerd om zo een transitie naar een optimaal duurzaam personenvervoersysteem te bevorderen.

Naast de analyse en de reflectie op de uitkomsten van de toepassing van de STSc-methodiek bestaat een deel van het afstudeeronderzoek uit een reflectie op het gebruik van de STSc-methodiek zelf. In paragraaf 9.5 wordt op basis van opgedane ervaringen een tweetal verbeteringen voor de methodiek aangegeven.

Tot slot van dit hoofdstuk biedt paragraaf 9.6 een korte terugblik op de hoofdvraag en deelvragen van het onderzoek.

9.1 Analyse van de uitkomsten van de scenario's

In deze paragraaf worden de scenario's met elkaar vergeleken op basis van een drietal duurzaamheidsdimensies, namelijk de drie belangrijkste probleemgebieden in het huidige personenvervoer: (1) congestie, (2) bereikbaarheid en leefbaarheid en (3) milieu¹. Vervolgens worden deze drie analyses geïntegreerd om te bepalen welk scenario meer duurzame mobiliteit biedt. Tot slot van deze paragraaf wordt naar veranderingen in het transitiepad gezocht, als opstap voor het formuleren van de beleidsadviezen.

9.1.1 Congestie

Op het gebied van **congestie** wordt in beide scenario's uiteindelijk de congestie verminderd. Er bestaat alleen een groot verschil in de manier waarop dit bereikt wordt. In scenario 1 vermindert de congestie door technologische ontwikkelingen, zoals automatische voertuiggeleiding, waarbij het gedrag van de reiziger nauwelijks verandert. Deze ontwikkelingen vragen om aanzienlijke investeringen in het vervoerssysteem om de infrastructuur en voertuigen aan te passen. De bereidheid tot deze investeringen door verschillende actoren is het gevolg van het voortdurend groter worden van het congestieprobleem. Scenario 1 is door deze ontwikkelingen een hightech variant van het bestaande personenvervoer, waarin het gedrag van de reiziger relatief weinig is veranderd. In scenario 2 vermindert de congestie door een co-evolutie van veranderingen op technologisch en maatschappelijk vlak. Naast de technologische vooruitgang begint, onder druk van lokale overheden, het reizigersgedrag te veranderen door meer gebruik te maken van het OV in plaats van de auto. Deze verandering begint door de introductie van een "Congestion Charge" in de grote steden. Automobilisten moeten een tolheffing betalen om in het centrum van de stad te mogen rijden. Als alternatief wordt een OV-systeem aangeboden dat betrouwbaarder, sneller en goedkoper is. Vanwege het succes van de maatregel gaan steeds meer steden de Congestion Charge invoeren, waardoor het voor reizigers steeds meer aantrekkelijk wordt om ook tussen steden met het OV te gaan reizen. Deze modal shift voor interlokaal reizen wordt door de overheid verder gestimuleerd door het sterk vergroten van de spitsheffing. Het resultaat hiervan is dat het congestieprobleem in vergelijking met scenario 1 eerder begint af te nemen. Daarnaast zijn grootschalige investeringen te doen om de infrastructuur aan te passen voor automatische voertuiggeleiding of andere technologische verworvenheden niet nodig. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat voor de duurzaamheidsdimensie van congestie scenario 2 wenselijker is.

9.1.2 Bereikbaarheid en Leefbaarheid

Op het gebied van **bereikbaarheid en leefbaarheid** vinden in de steden diverse veranderingen plaats. Op technologisch gebied valt in beide scenario's eenzelfde ontwikkeling te bespeuren in het bussempark waarbij de brandstofcelbussen dominant worden. Daarnaast ontstaat een duidelijk contrast tussen beide scenario's op basis van het gevoerde beleid door de lokale overheden. In het eerste scenario blijven de lokale overheden de dominantie van de auto in de stad tolereren. Bepaalde types voertuigen worden weliswaar geweerd door de introductie van een variabele parkeerheffing, maar dit resulteert niet in een stimulans om het OV te gaan gebruiken in plaats van de auto. De problematiek in de steden vermindert doordat in stedelijke gebieden meer gebruik gemaakt wordt van compactere voertuigen. Deze stadsvoertuigen worden extra aangeschaft in de huishoudens

¹gezondheidsbedreigende, levensbedreigende en klimaatveranderende emissies

wat resulteert in het ontstaan van groeiende parkeerproblemen in de woonwijken. Dit betekent dat in scenario 1 het probleem van bereikbaarheid en leefbaarheid verschuift van de binnenstad naar de woonwijken.

In het tweede scenario zijn de lokale overheden bereid om drastische maatregelen te nemen om de problematiek aan te pakken. Eén van die maatregelen is de introductie van de Congestion Charge als middel om het gebruik van het OV te stimuleren in de steden. De inkomsten van de maatregel worden gebruikt om de bereikbaarheid en leefbaarheid in de stad te verbeteren. Het resultaat is dat de rol van de auto in het tweede scenario drastisch vermindert, waardoor de bereikbaarheid en leefbaarheid in de steden groeit. Het in scenario 1 ontstane parkeerprobleem in de woonwijken trad in scenario 2 niet op. Voor de duurzaamheidsdimensie van bereikbaarheid en leefbaarheid kan geconcludeerd worden dat scenario 2 wenselijker is.

9.1.3 Milieu

Op **milieugebied** spelen technologische ontwikkelingen in beide scenario's een belangrijke rol. De komst van nieuwe technologieën, hybridevoertuigen en brandstofcelvoertuigen en van nieuwe brandstoffen, biobrandstoffen en waterstof, leveren een positieve bijdrage aan het verminderen van de milieuvervuulende emissies en daardoor het klimaatvriendelijker maken van het personenvervoer. Voor het eerste scenario worden de problemen op milieugebied met behulp van deze nieuwe technologieën, en optimalisatie van bestaande technologieën, gerealiseerd. Fossiele energiebronnen blijven in het scenario belangrijk voor het personenvervoer, zelfs bij de productie van waterstof. De komst van waterstoftechnologie zorgt wel voor centralisering van de emissies van schadelijke stoffen, waardoor het eenvoudiger wordt om met behulp van end-of-pipe technologieën, zoals filters, de milieuvervuulende emissies te reduceren.

Het tweede scenario verschilt in twee opzichten van het eerste scenario. Allereerst zorgt het stijgende aandeel van collectieve vervoersvormen voor een vermindering van de milieuemissies. Daarnaast wordt waterstof milieuvriendelijker geproduceerd. De oorzaak hiervan ligt in het overheidsbeleid waarin het gebruik van fossiele energiebronnen kunstmatig duurder wordt gemaakt ten opzichte van biomassa en duurzame energiebronnen. Het resultaat hiervan is dat in scenario twee een grotere vermindering van het milieuprobleem plaats vindt ten opzichte van scenario 1. Scenario 2 is voor de duurzaamheidsdimensie milieu dus wenselijker dan scenario 1.

Om te bepalen welk scenario de meest **duurzame mobiliteit** biedt is het noodzakelijk om de scenario's in het geheel te bekijken. In tabel 9.1 is hiervoor een overzicht gegeven van de conclusies per dimensie voor elk scenario.

Uit de tabel kan geconcludeerd worden dat voor elke dimensie scenario 2 een meer duurzame oplossing biedt dan scenario 1. Een tweetal factoren welke in scenario 2 optreden en niet in scenario 1 zijn hiervan de oorzaak. Allereerst is er sprake van een co-evolutie van technologische en maatschappelijke ontwikkelingen in scenario 2 in tegenstelling tot scenario 1 waar hoofdzakelijk technologische ontwikkelingen plaatsvinden. Door de co-evolutie worden de effecten van technologische en maatschappelijke verandering wederzijds versterkt. En ten tweede laat scenario 2 zien dat overheidsbeleid de effecten van ontwikkelingen kan beïnvloeden.

Als gekeken wordt naar de scenario's zijn er drie belangrijke richtingen in de ontwikkelingen te onderscheiden:

1. een verandering in het reizigersgedrag (modal shift)

	Scenario 1 Economisch Liberale Overheid	Scenario 2 Sturende Overheid
Congestie	Congestie vermindert door komst van automatische voertuiggeleiding. Deze maatregel vereist een grote financiële investering. Geen verandering in reisgedrag.	Congestie vermindert door verandering in reizigersgedrag. Rol individuele vervoersmiddelen neemt af, terwijl die van collectieve vervoersvormen toeneemt.
Bereikbaarheid en Leefbaarheid	Stedelijke maatregelen in de vorm van variabele parkeertarieven zorgen ervoor dat problemen in de binnenstad verminderen. Probleem verschuift naar de woonwijken waar een gebrek aan parkeerplekken ontstaat.	De Congestion Charge zorgt voor een toenemende vervoersrol van de OV binnen steden. De rol van de auto neemt af, waardoor de bereikbaarheid en leefbaarheid toenemen in de gehele stad.
Milieu	Technologische ontwikkelingen maken emissies schoner, maar de brandstofvoorziening blijft grotendeels afhankelijk van fossiele bronnen.	Technologische ontwikkelingen maken emissies schoner, en door heffingen van de overheid neemt de afhankelijkheid van fossiele bronnen af.

Tabel 9.1: Overzicht van de duurzaamheidsaspecten van elk scenario

2. de omslag naar energiezuinige voertuigen
3. de omslag van fossiele brandstoffen naar duurzame en biologische energiebronnen

In de volgende paragraaf wordt geanalyseerd hoe deze veranderingen in ontwikkeling ontstaan zijn en welke vormen van overheidsbeleid deze richting van ontwikkeling kunnen bevorderen.

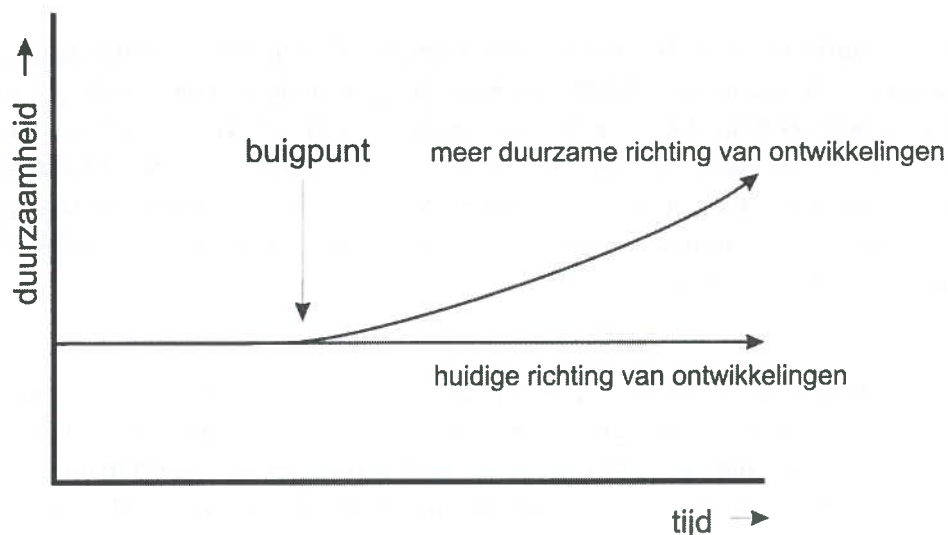
9.2 Beleidsadviezen naar aanleiding van de analyse

Om beleidsadviezen te kunnen formuleren is het noodzakelijk om te analyseren hoe de wenselijkere veranderingen in scenario 2 ontstaan zijn en niet in scenario 1. Dit betekent dat de buigpunten in de scenario's opgezocht dienen te worden. Buigpunten zijn het gevolg van nieuwe koppelingen die ertoe hebben geleid dat het transitiepad een ander richting is gaan volgen. In figuur 9.1 is deze definitie van een buigpunt geïllustreerd.

In de analyse van de scenario's is een drietal veranderingen in de ontwikkelingsrichting aangegeven. Voor elke richting zal het bijbehorende buigpunt in de scenario's bepaald worden. Daarnaast wordt gekeken welke beleidsmaatregelen het ontstaan van het buigpunt en de effecten daarvan kunnen bevorderen.

De eerste verandering is de verandering van het reizigersgedrag die optreedt in scenario 2 en niet in scenario 1. Dit transitiepad ontstaat doordat overheidsbeleid het gebruik van de auto minder aantrekkelijk maakt ten opzichte van alternatieven voor de auto die beschikbaar of in ontwikkeling zijn. Het verleden heeft laten zien dat een modal shift op landelijk niveau niet in één keer af te dwingen is. De stad Londen heeft met het instrument "Congestion Charge" ² laten zien dat op lokaal niveau het OV-aandeel in het totale vervoersaandeel verbeterd kan worden. Deze eerste stap levert misschien minimale resultaten, maar biedt wel perspectieven om verder op te bouwen. Er kan hierbij gedacht worden aan toepassingen in andere steden.

²een tolheffing om met de auto toegang te krijgen tot het centrum van de stad



Figuur 9.1: Illustratie van een buigpunt in een scenario

Een eerste beleidsadvies op basis van deze bevindingen luidt om, net zoals in scenario 2, eerst op kleine schaal in een enkele stad te experimenteren met de Congestion Charge. Positieve resultaten zullen andere steden enthousiasmeren om dezelfde maatregel in te voeren. Het totaal van lokale successen kan langzaam uit kunnen groeien tot een effect op landelijk niveau. Eventueel negatieve resultaten van het experiment moeten onderzocht worden zodat verklaard kan worden waarom in Londen de maatregel wel succesvol is en niet in de Nederlandse stad. Op basis van deze bevindingen kan het experiment aangepast worden.

Te verwachten is dat er aanvankelijk protesten van automobilisten zijn tegen deze maatregel³. Naar voorbeeld van Londen kunnen zichtbare verbeteringen in de bereikbaarheid en leefbaarheid van de stad met de bijbehorende investeringen deze protesten wegnemen. Zo is het noodzakelijk dat er een kwalitatief, betrouwbaar en snel alternatief beschikbaar is voor de auto in het stedelijke, en later interstedelijke, personenvervoer. Voor de investeringen kan gebruik gemaakt worden van de extra inkomsten verkregen door invoering van de Congestion Charge.

Naast deze twee basismaatregelen kan er nog een aantal extra maatregelen genomen worden om de bereikbaarheid en leefbaarheid te verbeteren. Op stedelijk niveau kan dit door de parkeertarieven te verhogen in verhouding met het ruimtebeslag van een voertuig. In scenario 1 werden door deze maatregel verbeteringen bereikt in de stedelijke bereikbaarheid en leefbaarheid. Op landelijk niveau kan de tijdelijke drukte tijdens spitsstijden verminderd worden door de invoering van een spitsheffing. Door de spitsheffing wordt het minder aantrekkelijk om op bepaalde plekken en tijdstippen te rijden. Het resultaat is dat de pieken in weggebruik uitgesmeerd worden.

De tweede verandering is de omslag naar het toenemende gebruik en ontwikkeling van energie-efficiëntere voertuigen. Het toenemende gebruik wordt gestimuleerd doordat de brandstofprijs hoog blijft. Daarnaast kan de overheid deze trend bevorderen door, zoals in beide scenario's, de aanschafbelasting bij een auto afhankelijk te maken van het energielabel van een voertuig en het opzetten van promotiecampagnes om de consument bewuster maken van energie-efficiëntere vormen van rijden.

³vanwege het gevoel van automobilist pesten

Verdere stimulering van de omslag naar energie-efficiëntere voertuigen kan geschieden vanaf Europees niveau door verdere aanscherping van de normen voor de emissies van milieuvervuilende stoffen. Op een gegeven moment zal het voor voertuig- en brandstof-fabrikanten niet meer mogelijk zijn om incrementele oplossingen te ontwerpen en zullen alternatieve ontwerpen toegepast dienen te worden. Door dit proces van regelgeving geleidelijk steeds strenger te maken hebben de verschillende voertuig- en brandstoffabrikanten de tijd om er op in te spelen.

De derde en laatste verandering wordt gevormd door de omslag van fossiele energiebronnen naar duurzame en biologische bronnen. In beide scenario's is de trend te zien dat onder invloed van normen voor emissies de technologie van de voertuigen steeds schoner wordt. Het is alleen niet vanzelfsprekend dat hiermee automatisch ook overgestapt wordt naar niet-fossiele energiebronnen. Voor consumenten en producenten zijn niet-fossiele energiebronnen interessant als deze goedkoper zijn dan fossiele bronnen.

De overheid kan ervoor kiezen, zoals in scenario 1, om de prijsverhouding tussen de fossiele en niet-fossiele energiebronnen aan de markt over te laten. Naarmate de schaarste van goedkope fossiele brandstoffen toeneemt stijgt de brandstofprijs en ontstaat ruimte voor niet-fossiele brandstoffen om marktaandeel te winnen. Om deze omslag te bevorderen kan de overheid het voor consumenten en producenten aantrekkelijker maken om duurzame en biologische bronnen te gebruiken in plaats van de fossiele bronnen. De overheid kan dit bereiken door de brandstofaccijnzen aan de pomp te koppelen aan de gehele brandstofketen. Daarnaast kan de overheid de duurzame productie van waterstof bevorderen door voor producenten de waterstofproductie uit niet-fossiele bronnen financieel aantrekkelijker te maken. In scenario 2 is dit gedaan door de introductie van een productieheffing voor producenten afhankelijk van de gebruikte energiebron.

Het belang van experimenten wordt benadrukt door Achterhuis and Elzen [1998] in het rapport "Cultuur en Mobiliteit". Zij concluderen dat de introductie van een nieuwe technologie, zoals waterstof, bevorderd kan worden door gebruik te maken van praktijk-experimenten. Bij de experimenten dienen diverse actoren betrokken te worden, die later het netwerk rondom de technologie gaan vormen. Dit zijn actoren vanuit: het productie- en distributieproces, overheden en de consumentenmarkt. Door de praktijkexperimenten krijgen de betrokken actoren een betere voorstelling van hoe de technologie ingebed kan worden in de maatschappij. De interactie tussen de actoren moet er voor zorgen dat gezamenlijk een afstemming tussen technologie en maatschappij wordt gevonden die voordelen biedt ten opzichte van het bestaande. Daar waar dit zoek- en leerproces succesvol verloopt, ontstaat een maatschappelijk draagvlak dat de toepassing van de technologie op grotere schaal kan bevorderen [Achterhuis and Elzen, 1998].

Samenvattend bestaat het voorgestelde transitiebeleid uit drie belangrijke elementen. Allereerst is het belangrijk dat de overheid met behulp van experimenteren leert wat de effecten van maatregelen zijn en hoe verschillende maatregelen en ontwikkelingen in het personenvervoer het best op elkaar afgestemd kunnen worden. Ten tweede moet in het beleid van de overheid een samenhang tussen maatregelen zijn: het autogebruik kan niet ontmoedigd worden zonder gelijktijdig een goed alternatief aan te bieden. En ten derde is de timing van maatregelen belangrijk: beleid kan pas aangescherpt worden als alternatieven zich op kleine schaal (bijvoorbeeld in experimenten) hebben bewezen.

9.3 Aanscherpen van de beleidsadviezen met behulp van de monstertheorie

Bovenstaande beleidsadviezen zijn gebaseerd op de analyse van de uitkomsten van de scenario's. In deze paragraaf wordt vanuit een filosofisch perspectief naar de introductie van een nieuwe technologie, zoals waterstof, gekeken. In het publieke debat worden nieuwe technologieën enerzijds vaak met tromgeroffel aangekondigd, maar anderzijds kunnen ze in datzelfde publieke debat verguisd worden. Deze aanvankelijke tegenstellingen in het publieke debat kunnen leiden tot een patstelling, waarbij het onduidelijk is of een nieuwe technologie geaccepteerd zal gaan worden of toch geweigerd. Met behulp van de monstertheorie van Martijntje Smits is het mogelijk een verklaring te geven voor het ontstaan van een patstelling. Daarnaast geeft Smits een aantal mogelijkheden aan waarmee de patstelling doorbroken kan worden [Smits, 2002].

Het ongebreideld toejuichen of verguizen van een nieuwe technologie leidt tot een patstelling, waarbij de nieuwe technologie verandert in een monster. Aan de ene kant is er de fascinatie voor de mogelijkheden die de technologie met zich meebrengt. Aan de andere kant bestaat de angst voor onbekende gevaren die een technologie met zich meebrengt. Een voorbeeld hiervan is genetisch gemodificeerd voedsel. Aan de ene kant is het geweldig om voedsel te laten groeien dat resistent is tegen diverse ziektes. Aan de andere kant eten mens en dier datzelfde voedsel op en ontstaat de vraag of er geen schadelijke gevolgen zijn voor de eigen gezondheid of die van nakomelingen [Smits, 2002].

De patstelling die ontstaat in het publieke debat is vanuit meerdere oogpunten onwenselijk. Voor partijen die betrokken zijn in het debat kan het ertoe leiden dat ze buiten het besluitvormingsproces geplaatst worden. Dit uitsluiten staat op gespannen voet met de democratische opvattingen over besluitvorming, welke vraagt een afweging te maken tussen een veelheid aan visies. Daarnaast bestaat het gevaar dat de discussie over de vormgeving van een nieuwe technologie gereduceerd wordt tot een ja/nee vraag. Ja we accepteren genetisch gemodificeerd voedsel of nee we accepteren het niet. Er is geen tussenweg, die zonder de patstelling wel zou kunnen ontstaan. Bijvoorbeeld: genetisch gemodificeerd voedsel wordt geaccepteerd onder de voorwaarde dat ze de menselijke weerstand tegen ziektes vergroot [Smits, 2002].

Smits verklaart het ontstaan van monsters als een categoriefout: het monster bevat kenmerken die volgens velen niet in de bestaande orde van dingen past. Het monster van Frankenstein is hiervan een voorbeeld. Dit wezen bezit menselijke trekken, maar gelijktijdig wordt met het menselijke wezen gespot doordat het wezen opgebouwd is uit dode en levenloze materialen. Het klonen van mensen is ook een monster geworden. Enerzijds past het kenmerk van reproduceerbaarheid bij de natuurlijke processen van flora en fauna., anderzijds botst het met het idee dat ieder individu uniek is en bestaat uit een unieke samenstelling van genetisch materiaal [Smits, 2002].

Volgens Smits vormen technologische innovaties een constante bron van nieuwe monsters. In het laboratorium lijken innovaties ideale oplossingen te bieden, maar buiten het laboratorium blijken ze vaak niet goed te passen in de bestaande praktijken. Het gevolg is een categoriefout waarbij er ruimte ontstaat voor dubbelzinnigheden als fascinatie en onbehagen [Smits, 2002].

Waterstoftechnologie is een potentieel monster. Berichtgevingen in de media laten de fascinatie zien voor waterstoftechnologie, omdat het een bijdrage zou kunnen leveren aan een meer duurzame samenleving op verschillende terreinen. De president van Amerika, George W. Bush zegt bijvoorbeeld in de State of the Union van 2003 [US Department of

Energy, 2004b]:

“A simple chemical reaction between hydrogen and oxygen generates energy, which can be used to power a car producing only water, not exhaust fumes. With a new national commitment, our scientists and engineers will overcome obstacles to taking these cars from laboratory to showroom so that the first car driven by a child born today could be powered by hydrogen, and pollution-free. Join me in this important innovation to make our air significantly cleaner, and our country much less dependent on foreign sources of energy.”

Maar waterstof botst ook met de maatschappelijke veiligheidsperceptie, omdat waterstof een gasvormige brandstof is. Naar aanleiding van een ongeluk met tankgas vol lachgas⁴, kondigde in 2002 de toenmalige minister Kamp van VROM een onderzoek aan naar een totaalverbod voor LPG, omdat het transport, de opslag en de uitgifte van gasen onaanvaardbaar gevaarlijk is. Het onveilige beeld van LPG kan in het publieke debat gekoppeld raken aan waterstof [Milieuloket, 2005; Wikipedia, 2005; National Hydrogen Association, 2004].

Dit onveilige beeld van nieuwe onbekende gassen staat haaks op de wetenschappelijke opinie over de veiligheid van waterstof. Daarin wordt waterstof als een veiliger brandstof beschouwd dan fossiele brandstoffen mits rekening gehouden wordt met de verschillende eigenschappen van de brandstoffen. Experimenten met auto's, die men vanaf een dertiende etage liet vallen, zouden aantonen dat de kans op een explosie van een LPG-tank kleiner is dan bij een benzine- of dieseltank [Wit, 2004].

In het publieke debat rondom waterstof is aan de ene kant de fascinatie voor de technologie door de vele voordelen die de technologie met zich meebrengt. Aan de andere kant is er de potentiële onveiligheid van waterstof. Momenteel lijkt nog geen sprake te zijn van een patstelling rondom waterstoftechnologie, maar het is voorstelbaar dat waterstof op een gegeven moment als een veiligheidsrisico wordt beschouwd. Een eventueel ongeluk met waterstof zal deze potentiële onveiligheid alleen maar bevestigen.

Waterstof heeft de potentie om een monster te worden. Voor de overheid kan dit een waarschuwing betekenen om niet alle kaarten op een enkele technologie in te zetten om naar een meer duurzame personenvervoersysteem te komen. Verstandig beleid houdt dan in dat de overheid meerdere opties moet openhouden tot, door voorontwikkeling, een beter inzicht ontstaat welke technologieën het meest wenselijk zijn. Dat is geen aantrekkelijke gedachte voor beleidsmakers, omdat zij een ontwikkeling willen sturen en niet “verslonden” willen worden door een monster. Om daaraan tegemoet te komen heeft Smits een aantal verschillende opties gesuggereerd om monsters te kunnen bezweren [Smits, 2002]:

- **Monster Uitbanning:** De nieuwe technologie past niet binnen de heersende orde van dingen (cultuur) en wordt op geen enkele manier geaccepteerd. De met waterstof gevulde zeppelin is een voorbeeld van een monster dat uitgebannen is. De oorzaak daarvan is de ramp in 1937 met de zeppelin Hindenburg. Aanvankelijk werd de waterstof in de zeppelin verantwoordelijk gehouden voor de ramp, waardoor het onderzoek naar toepassingen met waterstof jarenlang stil kwam te liggen [National Hydrogen Association, 2004; Smits, 2002].

⁴Op 2 juli 2001 ontplofte op een bedrijventerrein in Eindhoven een tankwagen met lachgas. Naast de enorme ravage op het bedrijventerrein waar het ongeluk plaatsvond, werd een auto op 100 meter afstand verpletterd door de vrachtwagen. In de nabijgelegen woonwijk ontstond gevelschade en vielen plafonds naar beneden [Milieuloket, 2005].

- **Monster Aanpassing:** Ondanks dat de nieuwe technologie niet binnen de cultuur past is er geen noodzaak om deze uit te bannen. In plaats daarvan moet de nieuwe technologie zich aanpassen zodat deze niet meer botst met de heersende orde. Een voorbeeld is het ontstaan van biodegradeerbare plastics. In het publieke debat rondom plastics was er een argument van tegenstanders, dat plastics milieubedreigend zijn, doordat ze in de natuur niet afgebroken werden. Een monster aanpassing is dan dat de plastics afbreekbaar worden gemaakt voor de natuur, zoals de biologisch afbreekbare plastic tasjes [Smits, 2002].
- **Monster Assimilatie:** In deze optie is er geen sprake van dat de technologie zich eenzijdig aan de heersende orde moet aanpassen, maar de cultuur verandert op bepaalde gebieden mee. Bij de introductie van de auto heeft een dergelijk proces plaatsgevonden. Aanvankelijk was er protest tegen de komst van de auto, omdat de paarden ervan schrokken en er een stofprobleem ontstond. Maar de cultuur veranderde ook door de komst van de auto. De eerste verkeersregels ontstonden, waarin de auto midden op de weg mocht rijden en de fietsers aan de zijkanten van de weg. De komst van de privé-auto maakte het mogelijk om zelf het tijdstip van reizen en de bestemming te bepalen. Inmiddels is de auto een centraal onderdeel van onze cultuur geworden [Geels, 2002b; Elzen, 2005; de la Bruheze, 2005; Smits, 2002].
- **Monster Omhelzing:** Hoewel een nieuwe technologie niet binnen de heersende orde van dingen past, is er ook geen noodzaak om de cultuur of de technologie aan te passen. In plaats daarvan wordt de nieuwe technologie geaccepteerd ook al leidt dit tot botsingen. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van kernenergie voor elektriciteitsopwekking. De productie van elektriciteit in een kerncentrale gaat gepaard met de productie van radioactief kernafval. Doordat dit afval niet te verwerken is tot ongevaarlijke stoffen botst de kernenergie met ons idee van veiligheid. Desondanks “accepteren” we dit bijeffect van kernenergie [Smits, 2002; Elzen, 2005; de la Bruheze, 2005].

In de praktijk is sprake van een cultuur die continue in ontwikkeling is en dus ook aan verandering onderhevig is. Nieuwe ontdekkingen kunnen het beeld op de wereld veranderen, zoals de computer: informatie hoeft niet meer fysiek bewaard te worden, maar kan ook virtueel (digitaal) bewaard worden (en uitgewisseld worden). Van de vier genoemde opties biedt alleen monsterbezwering door assimilatie de ruimte voor co-evolutie: culturele en technologische ontwikkeling. Bij technologische ontwikkelingen is er in de praktijk sprake van een gewenningsperiode, waarin technologie en cultuur op elkaar afgestemd worden om zo de nieuwe technologie te accepteren [Smits, 2002].

De overheid zou in haar beleid kunnen wachten tot het gewenningsproces voltooid is voordat een nieuwe technologie betrokken wordt in de beleidsplannen. Indien nodig kan de overheid reageren op ontstane patstellingen, zoals aanscherping van regelgeving om de veiligheid van toepassingen met waterstof te vergroten. Deze houding garandeert echter niet dat een transitie naar waterstoftechnologie tot een optimaal duurzaam personenvervoer zal leiden. In scenario 1 bleek dat zonder actief beleid van de overheid het aantrekkelijker is om fossiele bronnen te gebruiken voor de productie van waterstof. Uit dit voorbeeld komt een tweede eigenschap van waterstoftechnologie naar voren, namelijk dat waterstof niet persé milieuvriendelijker is dan de huidige fossiele brandstoffen en de afhankelijkheid van de fossiele energiebronnen niet hoeft te verminderen.

In plaats van deze afwachtende houding kan de overheid er ook voor kiezen een proactieve houding te nemen. Vanuit deze houding kan de overheid anticiperen op mogelijke patstellingen met betrekking tot nieuwe technologieën. Deze anticipatie biedt vervolgens mogelijkheden tot interventie voor de overheid [Smits, 2002]. In de waterstofcase kan de meer duurzame productie van waterstof bevorderd worden door tijdig beleidsmaatregelen te nemen die het aantrekkelijker maken om niet-fossiele bronnen te gebruiken voor waterstofproductie.

Op het gebied van de veiligheid kan de overheid de bevolking informeren, via reclamecampagnes, bijvoorbeeld door aan te geven dat waterstof een ander gedrag vraagt dan de bestaande brandstoffen. Waterstof is een vluchtige stof die snel hevig ontbrandt, terwijl fossiele brandstoffen minder hevig maar langdurig branden. Door dit verschil in eigenschappen kan waterstof op het gebied van veiligheid niet één-op-één vergeleken worden met benzine en diesel. Waterstof vraagt dus ook van gebruikers een andere omgang dan de bestaande fossiele brandstoffen. Een informatiecampagne kan de burger informeren over de voor- en nadelen van waterstof om zo te voorkomen dat waterstof van meet af aan in een slecht daglicht staat [Bosch et al., 2004].

Naar aanleiding van de monstertheorie en monsterbezweering van Martijntje Smits kan de overheid geadviseerd worden om in haar beleid niet een enkele technologie te prefereren boven andere alternatieven. Daarnaast kan een proactieve houding van de overheid met betrekking tot nieuwe technologieën, door anticipatie en interventie, leiden tot meer duurzame uitkomsten van het gewenningsproces bij nieuwe technologieën.

9.4 Het huidige beleid van de overheid en de geformuleerde beleidsadviezen

De geformuleerde adviezen kunnen vergeleken worden met het beleid van de Nederlandse overheid, zoals beschreven in de Nota Mobiliteit uit 2004. De kern van de nota is dat de overheid een faciliterende rol gaat spelen in het personenvervoer. Dit betekent dat de overheid zorgt voor een goed onderhouden en optimaal functionerende infrastructuur voor verschillende vervoersvormen. De overheid laat vervolgens de keuze aan de reiziger voor een bepaalde reisvorm met de daarbij komende voor- en nadelen [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004; Dikmans, 2004].

In scenario 1 worden dezelfde maatregelen genomen als in de Nota Mobiliteit. Uit de analyse van de scenario's volgt dat een meer duurzame oplossing bereikt kan worden als de overheid, zoals in scenario 2, een meer sturende houding aanneemt. Reizigers moeten gestimuleerd worden om collectieve vervoersvormen meer te gaan gebruiken in plaats van individuele. De slechte ervaringen uit het verleden met een landelijke modal shift geven aan dat niet meteen grootschalig ingezet moet worden. Het is aan te bevelen om eerst op kleine schaal te experimenteren met instrumenten om zo te leren op welke wijze voor alle betrokken partijen een gewenst resultaat ontstaat. Een voorbeeld van een instrument waar mee geëxperimenteerd kan worden is de Congestion Charge.

Om de milieuproblematiek van het personenvervoer te verminderen volgt de Nederlandse overheid voornamelijk internationale afspraken. In beide scenario's is rekening gehouden met de rol van de internationale afspraken op het gebied van de milieuproblematiek. Gezien de grootte van Nederland ten opzichte van andere landen (Duitsland, Amerika, Frankrijk, etc.) is het niet te verwachten dat Nederland een leidende rol kan

gaan spelen op het aanscherpen van de normen voor emissies [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004; Dikmans, 2004; Zuidgeest, 2004].

De Nederlandse overheid kan de keuze van de consument bij aanschaf van een voertuig wel beïnvloeden. Door de BPM afhankelijk te maken van het energielabel kunnen energie-efficiënte voertuigen in prijs aantrekkelijker gemaakt worden ten opzichte van de minder efficiënte voertuigen. Op brandstofgebied kan de overheid ook de keus van de consument voor niet-fossiele energiebronnen stimuleren.

Verder wil de overheid een gunstig ontwikkelingsklimaat creëren voor nieuwe technologieën, zonder daarbij in te zetten op één specifieke technologie [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004]. Dat is in de huidige situatie inderdaad wijs, zoals in de vorige paragraaf werd betoogd.

Op basis van de reflectie uit paragraaf 9.3 wordt tevens aan de overheid geadviseerd om advies aan de overheid verder om in de praktijk te experimenteren met verschillende technologieën en meer dan tot nu toe. Bij deze experimenten dienen diverse actoren betrokken te worden om zo te leren over de verschillende aspecten van de technologie, zoals: veiligheidsaspecten, de belofte van de technologie, verwachtingen bij actoren, etc. Dit proces geeft de overheid de mogelijkheid om samen met de betrokken actoren de uiteindelijke vorm van de technologie te bepalen. In de scenario's komt dit naar voren aan de productiezijde van waterstof. Zonder invloed vanuit de overheid is het waarschijnlijk dat producenten kiezen voor de meest winstgevende energiebronnen voor de waterstofproductie, dus de fossiele bronnen. Door bij het ontwikkelproces betrokken te zijn kan de overheid met gerichte maatregelen zorgen dat het aandeel niet-fossiele energiebronnen groter wordt.

Het beeld dat in de Nota Mobiliteit geschetst wordt is in grote lijnen vergelijkbaar met het geschetste economisch-liberale beleid in scenario 1. De verschillende instrumenten uit het scenario worden afzonderlijk van elkaar ingezet: (1) rekeningrijden om de congestie te verminderen door uitsmering van de files, (2) variabele parkeertarieven om de bereikbaarheid en leefbaarheid te verbeteren door het gebruik van grote voertuigen in de stad minder aantrekkelijk te maken en (3) een klimaatheffing om de milieuproblematiek te verbeteren door de aanschaf van energie-efficiënte voertuigen te bevorderen. In scenario 2 is hetzelfde aanbod van instrumenten aanwezig, maar ze worden beter op elkaar afgestemd om zo een groter effect te bereiken. Dus rekeningrijden en de variabele parkeertarieven zijn geen afzonderlijke maatregelen meer, maar worden ingezet in combinatie met de Congestion Charge en volwaardige alternatieven voor de auto. Door deze combinatie wordt een modal shift onder reizigers gestimuleerd.

Bij de inzet van maatregelen speelt timing ook een belangrijke rol. Het is niet zinvol om een Congestion Charge te introduceren als er geen volwaardige alternatieven zijn. De maatregel Congestion Charge wordt dan gezien als de zoveelste maatregel om de automobilist te pesten en leidt tot protesten. Het is eveneens niet zinvol om de waterstofproductie uit niet-fossiele energiebronnen pas te stimuleren als de gehele waterstofinfrastructuur zich ontwikkeld heeft. Waterstofproducenten zullen zich dan gedupeerd voelen, omdat ze hun gehele productie al afgestemd hadden op de meest winstgevende vorm.

De genoemde suggesties aan de overheid kunnen grofweg samengevat worden in de vorm van één hoofdadvis. De huidige beleidsinstrumenten worden teveel als afzonderlijke instrumenten ingezet op vaak willekeurige momenten. In plaats daarvan laten de paragrafen 9.1 tot en met 9.3 zien dat vooral de afstemming, de combinatie en timing, van verschillende instrumenten en ontwikkelingen op elkaar tot meer duurzame resultaten kan leiden.

9.5 De STSc-methodiek

In deze paragraaf wordt een tweetal aanbevelingen gedaan om de STSc-methodiek te verbeteren op basis van de opgedane ervaringen tijdens de uitvoering van dit afstudeeronderzoek. Het plan, zoals beschreven in hoofdstuk 2, bestaat uit de volgende stappen:

1. Ontwerpkeuzes en de contouren van het scenario
2. Inventarisatie van interessante transitie-elementen
3. De dynamiek van het regime
4. Inventarisatie van landschapsfactoren
5. Analyse van relevante niches
6. Ontwerpen van de scenarioskeletten
7. Ontwerpen van de scenario's
8. Analyse van de uitkomsten van de scenario's

In de praktijk bleek dit stappenplan in deze volgorde niet handig te zijn voor een onderzoeker die een nieuw onderzoeksterrein betreedt, omdat die nog onvoldoende inzicht heeft in het regime waarvoor de scenario's ontwikkeld moeten worden. In dit onderzoek is dan ook een afwijkende volgorde van het stappenplan gehanteerd. Bij aanvang van het onderzoek werden, door het schrijven van een onderzoeksplan, een aantal globale ontwerpkeuzes en contouren van de scenario's vastgelegd. Inhoudelijke keuzes konden nog niet gemaakt worden door een gebrek aan kennis over het personenvervoersysteem. Om hier meer inzichten te krijgen zijn na het schrijven van het afstudeervoorstel eerst het regime, niches en landschapsfactoren geïnventariseerd (stappen drie tot en met zes). Vervolgens werd een aantal inhoudelijke ontwerpkeuzes gemaakt (stap 1 voor de tweede maal), omdat toen een beter beeld ontwikkeld was over hoe de wereld eruit zag en welke randvoorwaarden gesteld konden worden. Vervolgens konden de transitie-elementen geïnventariseerd (stap 2) worden om uiteindelijk het scenarioskelet en de scenario's te ontwerpen. Tijdens dit afstudeeronderzoek is uiteindelijk de volgende route afgelegd:

1. Ontwerpkeuzes en de contouren van het scenario (eerste ronde)
2. De dynamiek van het regime
3. Inventarisatie van landschapsfactoren
4. Analyse van relevante niches
5. Ontwerpkeuzes en de contouren van het scenario (tweede ronde)
6. Inventarisatie van interessante transitie-elementen
7. Ontwerpen van de scenarioskeletten
8. Ontwerpen van de scenario's
9. Analyse van de uitkomsten van de scenario's

Voor het stappenplan van de STSc-methode betekend dit dat deze niet als een strikte opeenvolging van stappen gezien moet worden. Het moet meer gezien worden als de verschillende stappen die in een onderzoek moeten plaatsvinden. Afhankelijk van de bekendheid van de onderzoeker met het terrein waarvoor de scenario's ontworpen moeten worden, veranderd de volgorde van de stappen en moet een aantal stappen soms herhaald worden.

Een tweede punt voor verbetering van de methodiek is de weergave van stappen die genomen zijn in het ontwerpen van de scenario's. In de literatuurbronnen over de methodiek van sociotechnische scenario's zijn deze stappen niet zichtbaar geïmplementeerd. Alleen de eindresultaten, in de vorm van scenario's en de analyse daarvan, worden beschreven. Voor een gebruiker van de methodiek roept dit vragen op over hoe de scenario's tot stand zijn gekomen en op welke keuzes in de multi-level dynamiek deze gebaseerd zijn. Deze afstudeerscriptie vormt daarin een praktische invulling van de verschillende stappen. In hoofdstuk 6 is hiervoor een aantal tussenstappen ontwikkeld. Voor het weergeven van de verschillende transitie-elementen zijn probleemtabelen ontworpen (zie appendix C). Met deze tabellen wordt voor een ontwerper eenvoudig zichtbaar welke koppelingen in het scenario zullen gaan plaatsvinden, ze laten ook zien of er vanuit het multi-level perspectief een logisch verhaal ontstaat. Logisch betekent hierbij dat er geen ontwikkelingen uit de lucht komen te vallen, maar dat ontwikkelingen op een aannemelijke wijze uit elkaar kunnen voortvloeien.

9.6 Conclusie

In deze afstudeerscriptie is met behulp van de methodiek voor Sociotechnische Scenario's (STSc) een tweetal transitiepaden voor waterstoftechnologie verkend en op basis daarvan zijn beleidsadviezen aan de overheid geformuleerd. Deze verkenning heeft in een aantal stappen plaatsgevonden.

In de hoofdstukken 3 tot en met 5 is een inventarisatie gemaakt van de lopende ontwikkelingen, problemen en trends op regime-, niche- en landschapsniveau. Deze inventarisatie is gebruikt om meer inzicht te krijgen in het personenvervoer, maar ook om de scenario's te kunnen ontwerpen die aansluiten op de lopende ontwikkelingen.

In hoofdstuk 6 is vervolgens stap voor stap aangegeven hoe de scenario's ontworpen zijn en welke keuzes gemaakt zijn. Een belangrijke karakteristiek voor de ontworpen scenario's is dat er twee verschillende type overheden neergezet zijn, namelijk: een overwegend economisch-liberale overheid (zie hoofdstuk 7) en een meer sturende overheid (zie hoofdstuk 8). Door de rol van de overheid te variëren ontstaat een beter beeld van wat de invloed van de overheid op het transitiepad is en daarmee kunnen beleidsadviezen geformuleerd worden.

In de scenario's ontstonden verschillende transitiepaden mede door de verschillen in de rol die de overheden speelden. De economisch-liberale rol van de overheid uit scenario 1 leidde tot een hightech variant van het bestaande personenvervoer. Dit betekent dat de huidige technologieën in het regime vervangen zijn door verbeterde of nieuwe technologieën, maar dat voor de rest er weinig veranderd is op het sociale vlak. De sturende rol van de overheid uit scenario 2 had als gevolg dat, naast de technologische ontwikkelingen, ook op het sociale vlak ontwikkelingen plaatsvonden. Deze co-evolutie zorgt ervoor dat effecten van de ontwikkelingen elkaar wederzijds versterken. Hieruit volgt de conclusie dat een economisch-liberale overheid niet tot een optimaal duurzaam resultaat leidt en dat dit met een meer sturende overheid beter gerealiseerd wordt.

Om een beeld te schetsen van hoe zo'n sturende overheid eruit ziet zijn er in paragrafen 9.2 tot en met 9.4 beleidsadviezen geformuleerd. Dit is in een drietal stappen gebeurd. Op basis van de uitkomsten van de scenario's is gezocht naar de buigpunten die tot de verandering in de ontwikkelingsrichting in de scenario's hebben geleid. Bij de buigpunten is geanalyseerd welke rol de overheid kan spelen om de effecten van het buigpunt naar een optimaal duurzaam personenvervoer te versterken. Eén van de conclusies die daaruit volgt is dat een goed getimede combinatie van instrumenten een groter resultaat boekt, dan losse afzonderlijke maatregelen.

Met behulp van de monstertheorie is het potentiële waterstofmonster geanalyseerd. Aan de ene kant is waterstof fascinerend vanwege de belofte om een meer duurzaam personenvervoer te laten ontstaan. Aan de andere kant is er angst voor de onveiligheid voor waterstof. In het publieke debat kan dit tot een patstelling leiden met onverwachte gevolgen voor de nieuwe technologie: uitbanning, aanpassing, assimilatie of omhelzing. Omdat assimilatie, de co-evolutie van technologie en maatschappij, de meest optimale uitkomst biedt van de verschillende uitkomstmogelijkheden, is gekeken hoe deze uitkomst in het publieke debat bevorderd kan worden. Hierbij kunnen praktijkexperimenten een belangrijke rol spelen. Breng alle actoren, die te maken krijgen (of hebben) met de nieuwe technologie, bij elkaar en laat ze gezamenlijk experimenteren en leren, zodat een groter draagvlak voor de nieuwe technologie gecreëerd wordt.

In de derde stap zijn de geformuleerde adviezen voor de overheid afgezet tegen het beleid van de Nederlandse overheid. Belangrijke vraag hierbij was: Waar kan de Nederlandse overheid haar huidige beleid verbeteren om zo een meer duurzame uitkomst van het transitieproces te bevorderen. Als gekeken wordt naar het huidige beleid, zoals beschreven in de Nota Mobiliteit, dan wordt een geheel van losstaande instrumenten neergezet: rekeningrijden om de files te verminderen, nieuwe technologieën om de milieuvervuiling te verminderen, benutten van de kracht van het OV. Op basis van de scenario's kan geconcludeerd worden dat een betere afstemming van instrumenten en een inzet op het juiste moment tot meer duurzame resultaten kan leiden. Zo wordt bijvoorbeeld in Londen een tolheffing aan de rand van een stad gebruikt om het autogebruik in de stad te ontmoedigen. Door gelijktijdig alternatieven voor de auto aan te bieden, is niet het beeld van automobilisten pesten ontstaan, maar is er sprake van een modal shift in Londen.

De STSc-methodiek is toegepast op de case van waterstoftechnologie. De algemene verwachting is dat waterstoftechnologie een bijdrage kan leveren aan een meer duurzaam personenvervoer. De scenario's laten zien dat waterstoftechnologie niet per definitie duurzaam hoeft te zijn en dat andere opties of de combinatie daarvan tot betere resultaten kunnen leiden. Een groter aandeel van het collectieve vervoer kan ook tot een aanzienlijke reductie van milieuvervuilende emissies leiden zeker met waterstofbussen die rijden op duurzaam geproduceerde waterstof. De scenario's laten verder zien dat waterstof verschillende gradaties van duurzaamheid heeft. De economisch-liberale rol van de overheid uit scenario 1 leidt tot een waterstofproductie vanuit de financieel meest aantrekkelijke energiebronnen: namelijk de fossiele energiebronnen. De emissies van miljoenen voertuigen worden daardoor geconcentreerd bij waterstofproductiecentrales. Dit maakt end-of-pipe technologieën mogelijk waardoor de milieuvervuilende gassen niet in de lucht terecht komen waarmee de duurzaamheid wordt bevorderd.

In scenario 2 leidt het sturende beleid van de overheid tot een groter aandeel niet-fossiele energiebronnen⁵ voor de waterstofproductie. Dit wordt bereikt door de grotere financiële winstmarge van fossiele energiebronnen weg te nemen. Door deze sturende

⁵klimaatneutrale en duurzame energiebronnen, zoals: biomassa, zon, zee en wind

houding van de overheid wordt de waterstoftechnologie in scenario twee meer duurzaam dan in scenario 1.

De conclusie dat een meer pro-actieve overheidsbeleid tot meer duurzame uitkomsten kan leiden is op zich niet nieuw. Tegelijkertijd is die conclusie wel omstreden. Diverse economen, politici en beleidsmakers geloven heilig in de vrije markt en vinden dat de overheid zich zo terughoudend mogelijk moet opstellen.

In het debat tussen voor- en tegenstanders van een pro-actief overheidsbeleid worden vaak heel algemene en simplistische beelden gepresenteerd van de te verwachten effecten van beide posities. De STSc methode kan dat debat verrijken door rijkere en meer samenhangende beelden te schetsen van mogelijke toekomstige ontwikkelingspaden. En dat hoeft dan niet te leiden tot een simpele keuze vóór of tegen een pro-actieve overheid, maar kan inzicht bieden in onder welke omstandigheden een pro-actief optreden nuttig zou kunnen zijn en wanneer men het beter aan de markt kan overlaten. In het bovenstaande zijn daarvan een aantal voorbeelden gegeven.

Die aanbevelingen zijn zeer algemeen, omdat de doelstelling van dit onderzoek vooral is om te laten zien dat de STSc methode een belofte inhoudt. De uitgangspunten in het ontwikkelen van beide scenario's waren daarom arbitrair met als enig doel om voldoende contrast te kunnen creëren dat laat zien dat een verschil in opstelling van de overheid tot heel verschillende uitkomsten kan leiden. Om tot meer verfijndere aanbevelingen te kunnen komen kan de methode worden gebruikt om met andere ontwerpkeuzes verschillende transitiepaden te verkennen.

Naast de analyse en reflectie op de uitkomsten van de scenario's is nog een tweetal verbeterpunten voor de STSc-methode aangegeven in paragraaf 9.5. Allereerst moet het stappenplan niet als een simpele opeenvolging van stappen gezien worden, maar als een lijst van noodzakelijke stappen. De volgorde van de stappen is afhankelijk van de bekendheid van de onderzoeker met het terrein.

Een tweede verbeterpunt voor de STSc-methode is om het gehele ontwerpproces van de scenario's meer expliciet te maken. In deze scriptie is een aantal stappen van de STSc-methodiek meer in detail uitgewerkt, zodat voor toekomstige onderzoekers duidelijk wordt hoe de stappen uitgevoerd kunnen worden.

In conclusie kan gezegd worden dat waterstoftechnologie zeker een bijdrage kan leveren aan een transitie naar een meer duurzaam personenvervoer, maar dit leidt niet automatisch tot de meest duurzame vorm. De overheid kan met behulp van diverse beleidsmaatregelen, die goed getimed en op elkaar afgestemd zijn, de bijdrage van waterstof aan een optimaal duurzaam personenvervoer stimuleren. De STSc-methodiek is daarbij een geschikt instrument om het beleid van de overheid concreet in te vullen. Een interessante vraag die hierbij open blijft staan is wat de resultaten van de toepassing van dit instrument zijn als vanuit het perspectief van de industrie wordt gekeken.

Bijlage A

Lijst van geïnterviewden

Datum	Geïnterviewde	Instantie
27 - 10 - 2004	Drs. R. Mallant	Energieonderzoek Centrum Nederland, Onderzoeksgebied Brandstofceltechnologie
29 - 10 - 2004	Dr. ir. R. van den Hoed	Ecofys, in 2004 aan de TU Delft gepromoveerd op het gebied van brandstofcelvoertuigen
05 - 11 - 2004	Mr. S. Schouten	ANWB, afdeling Algemeen Ledenbelang
05 - 11 - 2004	Mr. A. Dikmans	Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Projectleider Nota Mobiliteit
08 - 11 - 2004	A. Hablé	Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Projectleider Transitie Duurzame Mobiliteit
08 - 11 - 2004	Mr. L. Zuidgeest	Ministerie VROM, projectleider Beleidsnota Verkeersemisies
18 - 11 - 2004	Mr. H. de Wit	Linde Gas / Hoekloos, contactpersoon CUTE demonstratieproject
19 - 11 - 2004	E. van den Braak	Gemeente Amsterdam, vervoerscoördinator

Bijlage B

Interviewvragen

Tijdens de interviews zijn een achttal onderwerpen aan bod geweest. Hierbij is afhankelijk van de geïnterviewde gefocused op de beschikbare kennis bij de geïnterviewde (zie tabel B.1). De gestelde vragen zijn:

1. Wat ziet u als de belangrijkste problemen in het personenvervoer? Hoe urgent en nijpend zijn deze problemen?
2. Als u naar het probleem van ...¹ kijkt, ziet u dan mogelijkheden om met de huidige technologieën, al dan niet verbeterd, de problemen op te lossen?
 - (a) Zo ja, op welke termijn en welke manier zal dit dan kunnen geschieden?
 - (b) Zo nee, welke barrières zijn er dan die niet genomen kunnen worden met de huidige technologieën? En op welke manier (en termijn) zou deze barrière dan wel genomen kunnen worden?
3. In hoeverre zijn er structurele veranderingen nodig of wenselijk? Bijvoorbeeld nieuwe vervoerssystemen, minder auto's in de steden (gecombineerd met verbeterd OV of andere voorzieningen)
4. Op welke manier zou waterstoftechnologie (o.a. voor welke types voertuigen) een bijdrage kunnen leveren aan een oplossing van de problematiek binnen het personenvervoer? Welke problemen zou het niet kunnen oplossen of zouden er nieuwe problemen kunnen ontstaan?
5. Welke barrières staan er nu nog in de weg voor waterstoftechnologie?
6. Op welke manier & termijn kunnen deze barrières genomen worden?
7. Op welke termijn & manier verwacht u dat de brandstofcelaandrijving concurrentie gaat vormen voor de verbrandingsmotor?
8. Zijn er concurrenten voor waterstof die ook schoon zijn? Welke voor- en nadelen hebben deze? En op welke termijn zal deze concurrent zich laten zien?

¹Per geconstateerde probleem in vraag één wordt deze vraag behandeld

CRUCIALE FACTOR → ACTOR ↓		Regime					Niche		
		Bereikbaarheid	Leefbaarheid	Gezondheidsbedreigende en luchtvervuilende emissies	Klimaatveranderende emissies	Bijdrage verkeerssysteem, voertuigtypes	Productie H ₂	Opslag H ₂	Veiligheid H ₂
Overheden									
Ministerie V&W: DGP	A. Dikmans	X	X	(x)	(x)	(x)			
Ministerie V&W: Transitieteam	A. Hablé	X	(x)	X	X	X			
Ministerie VROM: Milieu	L. Zuidgeest			X	X	X			
Gemeente A'dam	E. van den Braak	X	X	X		(x)			
Producenten									
(H ₂) Hoekloos	H. de Wit						X	X	X
(H ₂) ECN	R. Mallant			X	X		X	X	
Consumenten									
ANWB	S. Schouten	X	(x)	(x)	(x)	(x)			
(H ₂) GVB			X	X	X	X			X
Overige									
(H ₂) TU-Delft	R. van den Hoed	(x)	(x)	X	X		X	X	X

Tabel B.1: Overzicht van geïnterviewden en de onderwerpen waarover de geïnterviewde kennis bezit, aangegeven met een X, of waarover kennis wordt verwacht, aangegeven met een (x).

Bijlage C

Probleemtabellen

In deze bijlage zijn de probleemtabellen opgenomen die gebruikt zijn als ontwerphulp-middel voor de scenario's. De probleemtabellen geven weer hoe op verschillende niveaus (landschap, regime en niche) het scenario zich ontwikkelt ten gevolge van gemaakte ontwerpkeuzes (zie 6.2.1). Hierbij is het scenario verdeeld in de drie probleemgebieden uit hoofdstuk 3, namelijk congestie, bereikbaarheid & leefbaarheid en milieu (gezondheidsbedreigende, luchtverontreinigende en klimaatveranderende emissies).

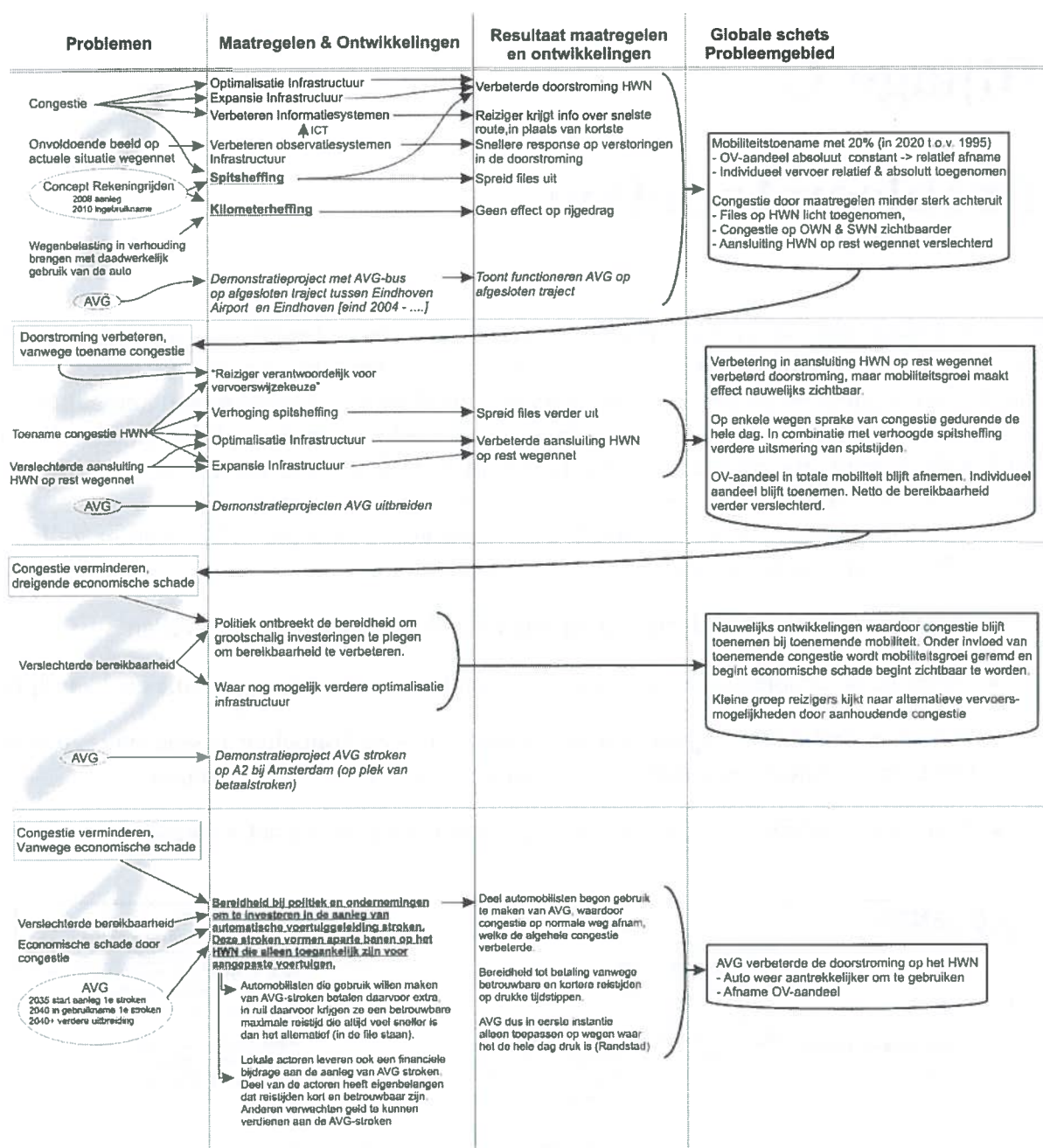
De legenda voor de probleemtabellen is weergegeven in figuur C.1. Verder zullen in de tabellen de volgende punten in acht genomen worden:

- Relaties tussen verschillende onderdelen worden aangegeven met pijlen
- Pijlen in de probleemtabellen lopen vloeiend en hebben 1 beginpunt en 1 eindpunt
- **Nieuwe ontwikkelingen** zijn het gevolg van een koppeling tussen meerdere factoren en opvallend gemaakt door ze vet te maken en te onderstrepen
- *Niche Ontwikkelingen* zijn opvallend gemaakt door ze cursief weergegeven

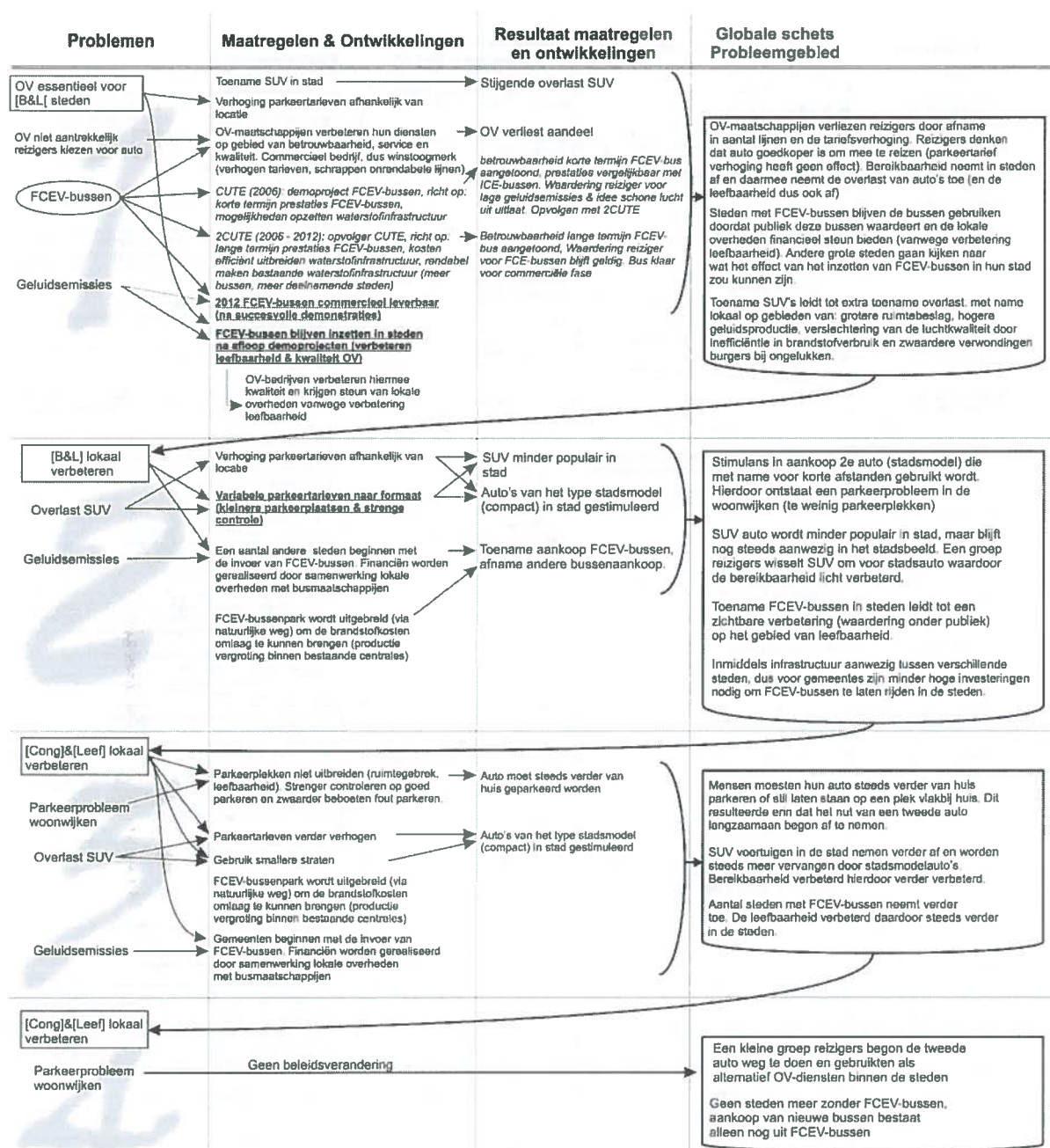
LEGENDA		
Landschap	Periode 1: 2005 - 2015 Periode 2: 2015 - 2025 Periode 3: 2025 - 2035 Periode 4: 2035 - 2050	ICE = Verbrandingsmotor auto EV = Elektrisch voertuig HEV = Hybride, combinatie ICE & EV FCEV = Brandstofcelvoertuig AVG = automatische voertuiggeleiding
Niche	[Cong] = Congestie [B&L] = Bereikbaarheid & Leefbaarheid [Co2] = Klimaatveranderende emissies [G] = Gezondheidsbedreigende & luchtverontreinigende emissies	HWN = Hoofdwegennet OWN = Onderliggend wegennet SWN = Stedelijk wegennet
Nieuwe ontwikkelingen		
<i>Niche ontwikkelingen</i>		

Figuur C.1: Legenda bij de probleemtabellen

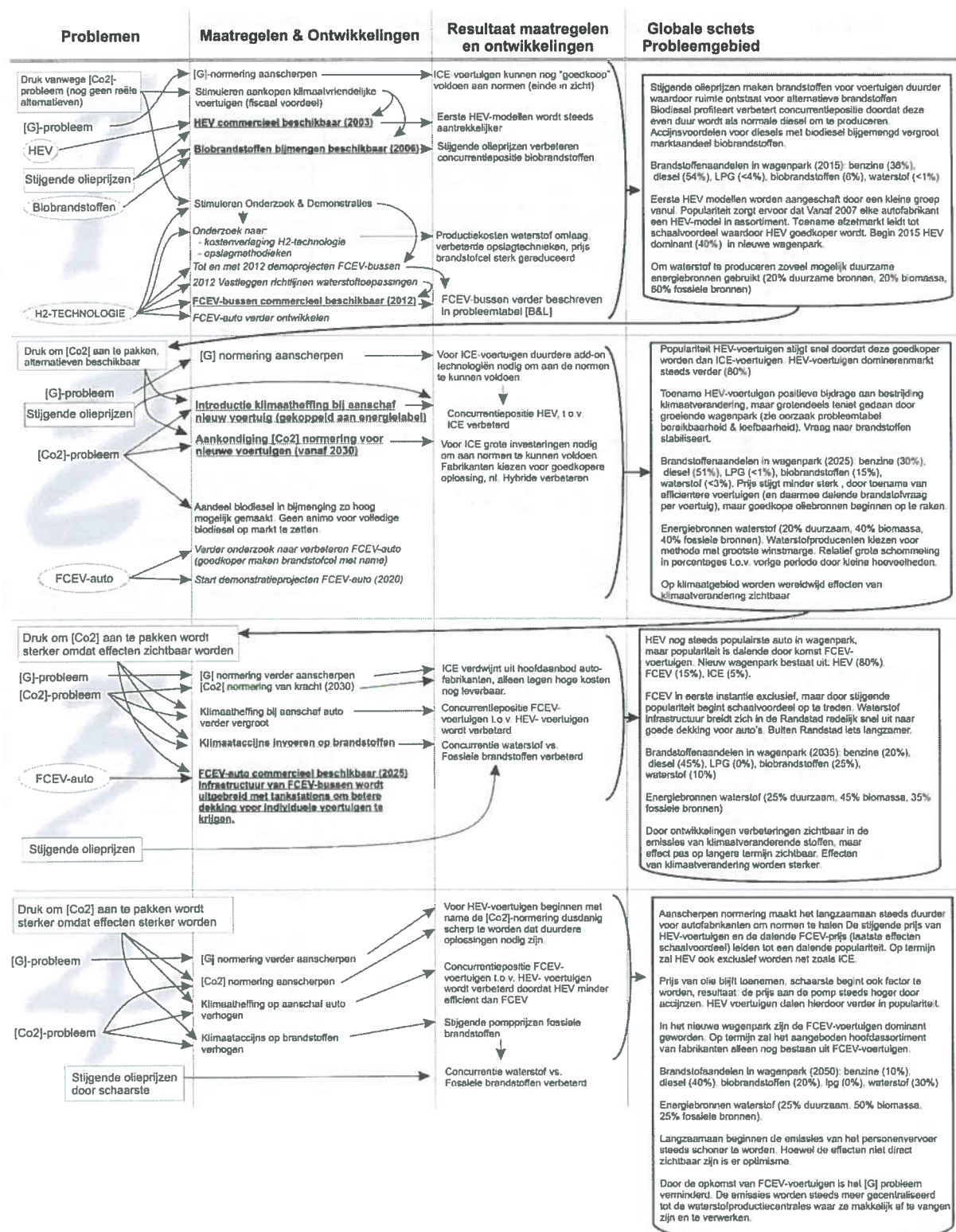
De ontworpen probleemtabellen voor scenario 1 zijn weergegeven in tabellen C.1 tot en met C.3 en voor scenario 2 in tabellen C.4 tot en met C.6. In de probleemtabellen van scenario 2 zijn afwijkende ontwikkelingen ten opzichte van scenario 1 met een grijze achtergrond zichtbaar gemaakt.



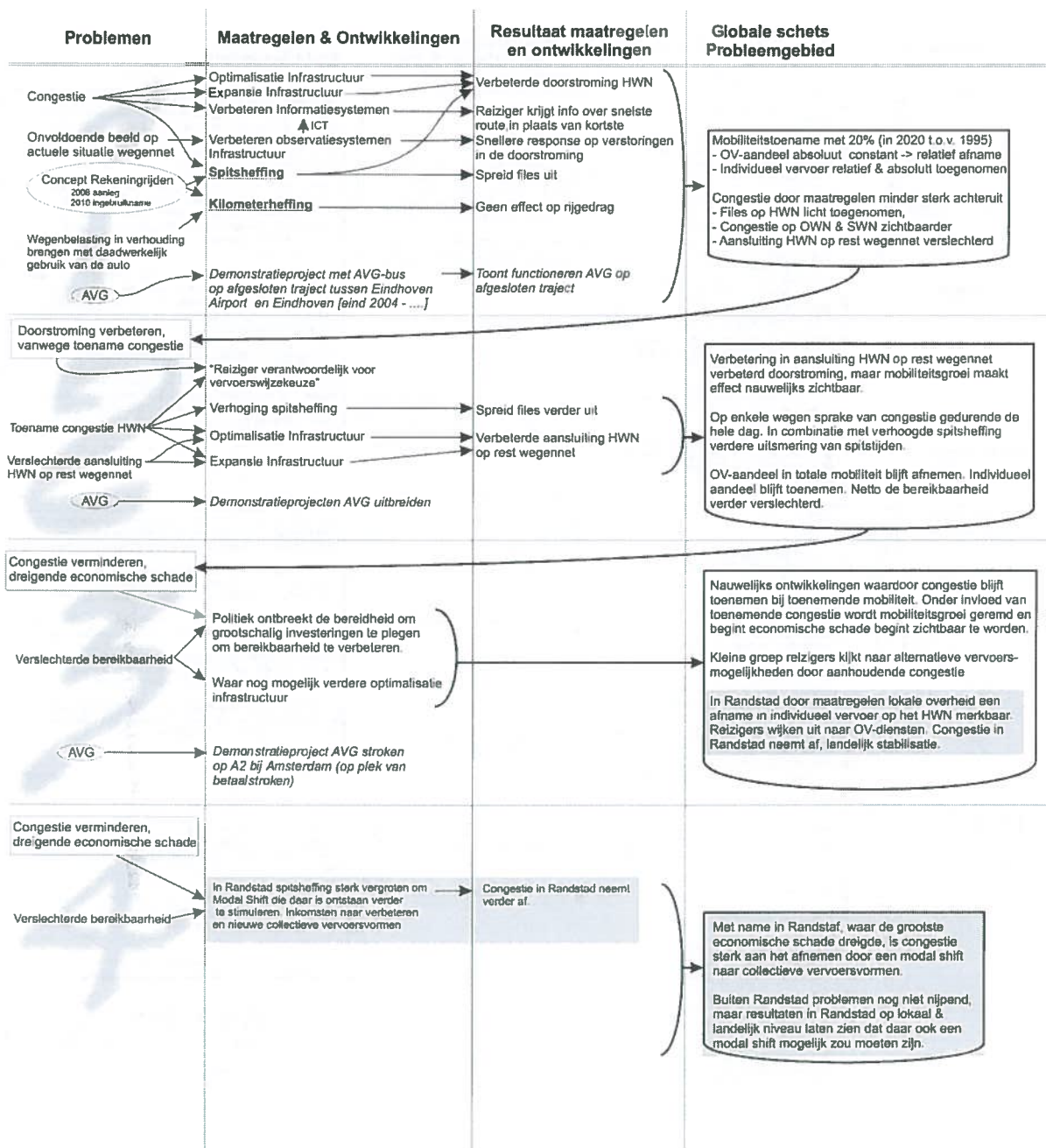
Tabel C.1: Scenario 1 - Probleemtabel Congestie



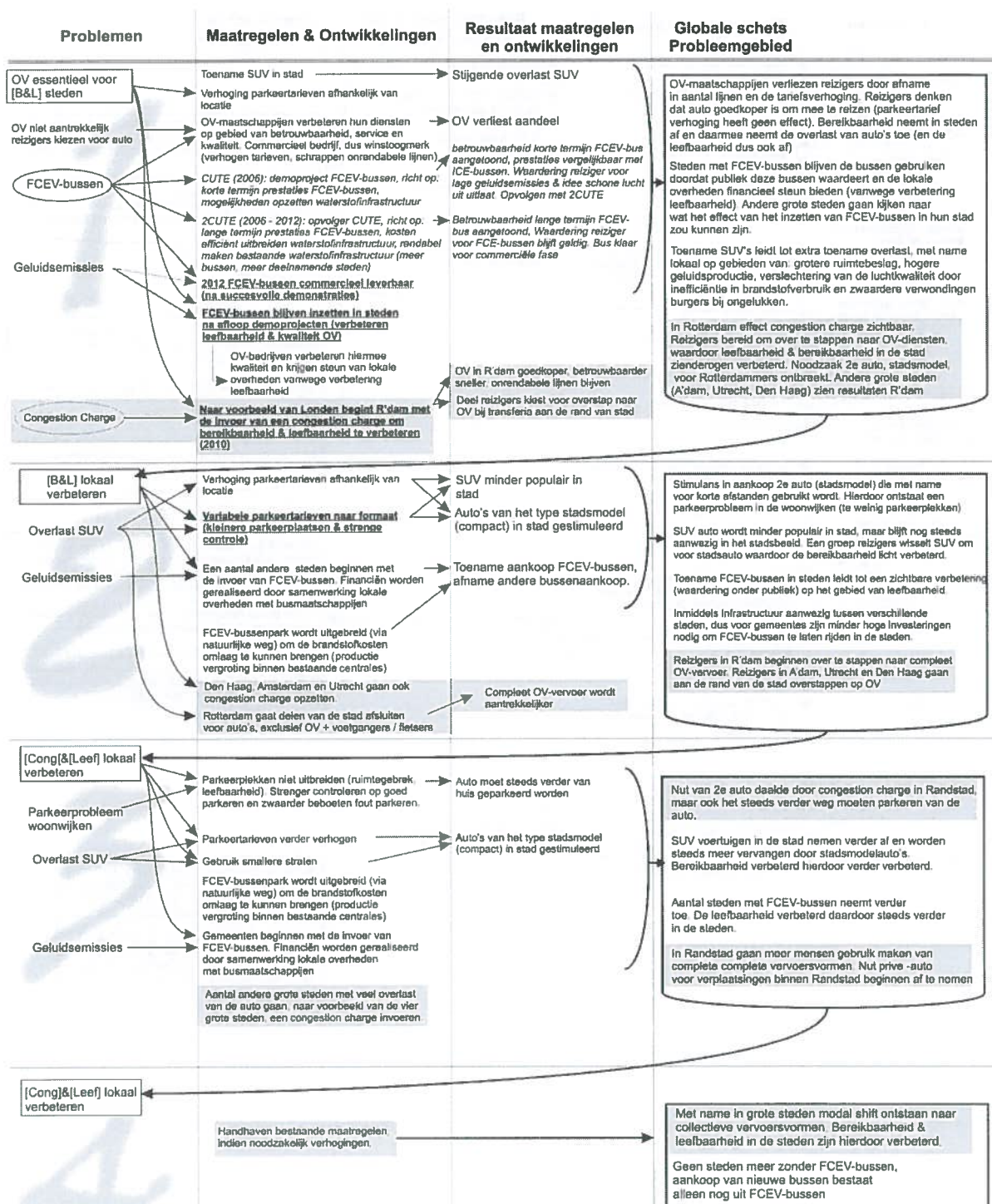
Tabel C.2: Scenario 1 - Probleemtabel Bereikbaarheid & Leefbaarheid



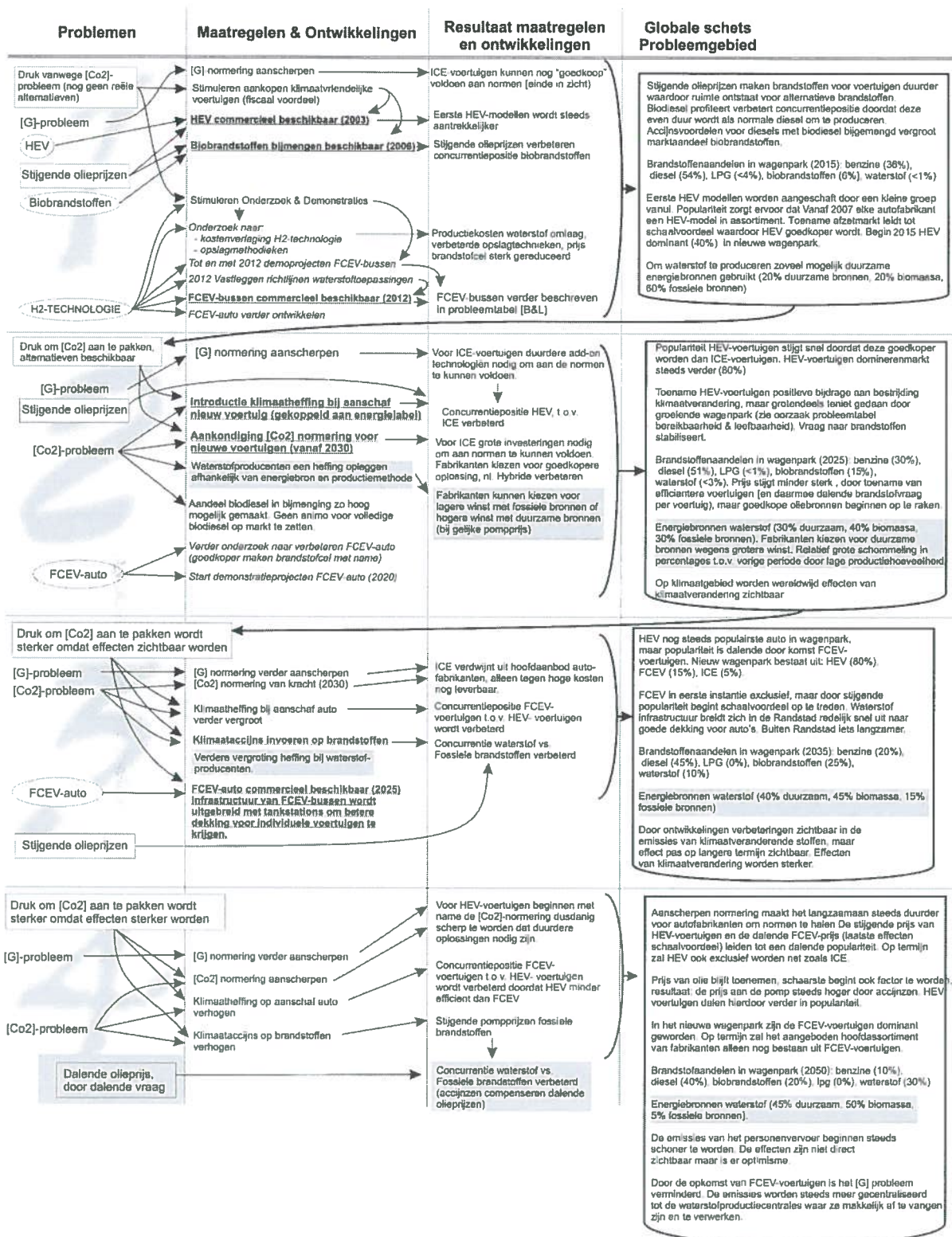
Tabel C.3: Scenario 1 - Probleemtabel Milieu



Tabel C.4: Scenario 2 - Probleemtabel Congestie



Tabel C.5: Scenario 2 - Probleemtabel Bereikbaarheid & Leefbaarheid



Tabel C.6: Scenario 2 - Probleemtabel Milieu

Bijlage D

Scenarioskeletten

De scenarioskeletten vormen de ruggegraat voor de scenario's en worden verkregen door de drie probleemtabelen uit appendix C te integreren. Het gehele scenarioskelet wordt weergegeven in de vorm van een aantal tabellen. Voor elke periode van een scenario is een losse periodetabel gemaakt bestaande uit een viertal kolommen:

- nieuwe ontwikkelingen: de ontwikkelingen die hun intrede in het regime maken gedurende een periode ten gevolge van koppelingen tussen landschap-, regime- en nicheniveau
- regime ontwikkelingen: de veranderingen op regime niveau ten gevolge van intensivering van bestaande middelen en het introduceren van nieuwe ontwikkelingen
- probleemontwikkelingen: een schets van hoe de probleemgebieden zich gedurende een periode ontwikkeld hebben ten gevolge van de regimeontwikkelingen
- niche ontwikkelingen: de ontwikkelingen die op nicheniveau hebben plaatsgevonden

Na de vier periodetabellen per scenario volgen nog een aantal thematabellen die van een aantal thema's de ontwikkeling gedurende het scenario quantificeren. Thema's die in de tabellen naar voren komen zijn: verhouding OV versus auto, samenstelling totale wagenpark, brandstofverdeling in het wagenpark, energiebronnen voor waterstofproductie. Deze thematabellen kunnen eventueel nuttig zijn voor reflectie op de scenario's.

Het skelet van een scenario bestaat dus uit een viertal periodetabellen en de thematabellen. Voor scenario 1 is het skelet beschreven in de tabellen D.1 tot en met D.7. En voor scenario 2 is het skelet beschreven in de tabellen D.8 tot en met D.14.

Afkortingen

Doordat de periodetabellen beperkt zijn in grootte (maximaal 1 A4) is het in bepaalde gevallen noodzakelijk geweest om afkortingen te gebruiken. Dit is zoveel mogelijk vermeden ten behoeve van de leesbaarheid. De betekenis van de afkortingen is hetzelfde als bij de probleemtabelen:

[Cong]	Congestie
[B&L]	Bereikbaarheid & Leefbaarheid
[G]	Gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissies
[CO ₂]	Klimaatveranderende emissies
ICE	Auto met alleen een verbrandingsmotor
HEV	Auto met een elektrische motor en een verbrandingsmotor
FCEV	Auto met brandstofcel en elektrische motor
AVG	Automatische Voertuig Geleiding
HWN	Hoofdwegennet
OWN	Onderliggend Wegennet
SWN	Stedelijk Wegennet
i.c.m.	in combinatie met

Nieuwe koppelingen	Regime Ontwikkelingen	Probleem Ontwikkelingen	Niche Ontwikkelingen
Vanuit overheid wenselijk om wegenbelasting individuele voertuigen te koppelen aan daadwerkelijke weggebruik: concept rekeningrijden. Naast kilometerheffing een spitsheffing invoeren als extra middel om rijgedrag op bepaalde plaatsen en tijdstippen te ontmoedigen. In 2008 start aanleg, 2010 in gebruik. De gedemonstreerde brandstofbussen vormen voor lokale overheden een mogelijkheid om de leefbaarheid in de steden te verbeteren. Voor OV-bedrijven vormen de brandstofbussen een mogelijkheid om de kwaliteit van de OV-diensten te verbeteren. Vanaf 2012 gingen de bussen na afloop van de demonstratieprojecten het commerciële traject in. De wens om klimaatvriendelijkere brandstoffen voor verbrandingsmotorvoertuigen te hebben maakten dat de in niches ontwikkelde biobrandstoffen vanaf 2006 in bijgemengde vorm leverbaar werden bij de benzinepompen.	Congestiebestrijding door naast spitsheffing: optimalisatie & expansie infrastructuur. Observatiesystemen verbeteren, koppelen aan informatiesystemen voor snelste reistijd. Snellere en adequater reactie op verstoringen. Lokaal OV essentieel voor doorstroming, maar OV is commercieel. Kwaliteit OV verbeteren maar winst ook belangrijk. Onrendabele lijnen schrappen, tarieven verhogen. Lokaal toename SUV-overlast (lawaaï, ruimtebeslag, onveiligheid) In 2CUTE steden brandstofbussen blijven rijden met steun lokale overheden (reden: leefbaarheid+, kwaliteit OV+) HEV aantrekkelijker (fiscaal voordeel, stijgende brandstofprijzen). Vanaf 2007 elke autofabrikant HEV-model in assortiment. Verkoop biobrandstoffen stimuleren met accijnsvoordeel naar ratio aandeel bijmenging biologisch in brandstof. Gezondheidsbedreigende en luchtverontreinigende emissienormen verder aanscherpen.	Maatregelen verbeteren doorstroming maar groeiende mobiliteit doet resultaat teniet. Congestie neemt toe door stijgend aandeel individueel vervoer. OV-aandeel relatief dalende (te duur, tijdsinefficiënt, onbetrouwbaar of niet beschikbaar). Absolute reizigerskilometers met OV constant. Optimalisatie infrastructuur gefocust op hoofdwegennet. Andere delen wegennet nauwelijks aangepakt en daar nam de congestie dan toe. Zichtbaar door verbeterde observatie van wegennet. Lokale verbeteringen leefbaarheid door brandstofbussen wekt interesse andere steden. Kijken naar mogelijkheid om ook brandstofbussen in hun stad te laten rijden. Overlast SUV-voertuigen creëert lokaal draagvlak voor nemen van maatregelen. HEV wint snel aan populariteit door duurder wordende olie en fiscaal voordeel. HEV en biobrandstoffen voldoende ontwikkeld om verder gestimuleerd te worden.	Wegens gebrek alternatieven voor fossiele brandstoffen & voertuigen op lange termijn onderzoek naar waterstoftechnologie stimuleren. Focus op kostenverlaging technologie en verbeteren opslag van waterstof tijdens transport. Daarnaast demonstratieprojecten. Brandstofbussen in CUTE succesvol gedemonstreerd (2003 - 2006). Opvolging door 2CUTE (2006 - 2012), focus op lange termijn prestaties bussen en hoe kostenefficiënt uitbreiden waterstofinfrastructuur. Daarnaast bussenvloot vergroten om productie rendabeler te maken. In 2012 internationale richtlijnen vastgelegd voor toepassingen met waterstoftechnologie. Hierdoor vrijbaan voor commerciële toepassingen met H₂-tech. Na afloop 2CUTE in 2012 brandstofbussen commercieel traject in. FCEV-auto's verder ontwikkelen (prijs brandstofcel en opslag). Sinds eind 2004 werd Automatische Voertuig Geleiding gedemonstreerd in de vorm van Hoogwaardig Openbaar Vervoer tussen het centrum van Eindhoven en het nabijgelegen vliegveld.

Tabel D.1: Skelet scenario 1 - periode 1 (2005 - 2015)

Nieuwe koppelingen	Regime Ontwikkelingen	Probleem Ontwikkelingen	Niche Ontwikkelingen
Overlast van SUV voertuigen lokaal en de druk om de leefbaarheid te verbeteren leiden tot invoering van variabele parkeertarieven afhankelijk van ruimtebeslag. Onder invloed van druk uit het landschap en de aanwezigheid van alternatieven (HEV) wordt bij de aanschaf van een nieuw voertuig vanaf 2020 een klimaatheffing ingevoerd. Deze klimaatheffing is gekoppeld aan voertuig energielabels. Naast de klimaatheffing werden klimaatemissienorm (CO_2, CH_4) vanaf 2030 voor nieuwe voertuigen aangekondigd.	Aansluiting HWN op rest infrastructuur optimaliseren en expanderen. Spitsheffing verhogen om rijden in de spits te ontmoedigen. Lokale overlast SUV werd tegen gegaan door introductie variabele parkeertarieven naar ruimtebeslag. Aanscherping van de gezondheidsbedreigende normen leidt ertoe dat voor ICE-voertuigen duurdere add-on technologieën noodzakelijk worden. ICE wordt duurder in aanschaf. Aandeel biobrandstoffen in fossiele brandstoffen zo hoog mogelijk maken, geen animo pure biobrandstoffen. Aantal steden met FCEV-bussen groeit vanwege positief effect in grotere steden. Dus verdere uitbreiding van de waterstofinfrastructuur.	Verbeteringen infrastructuur verbeteren doorstroming, maar mobiliteit is blijven toenemen. Congestie neemt toe, bepaalde plekken in Randstad ovedag continu file. Variabele parkeerplaatsen leidde tot vermindering van grote voertuigen auto in de stad. Stimulering van aankoop extra kleine auto voor in de stad (compact model). Parkeerproblemen in woonwijken ontstaan door extra auto's. Toename van efficiëntere voertuigen in het wagenpark leidt tot stabilisering in de vraag naar brandstoffen, maar goedkope oliebronnen beginnen op te raken (olieprijs blijft stijgen). Populariteit van HEV stijgt door prijsvoordelen (massaproductie, ICE duurder, duurdere olie). HEV dominant in nieuwe wagenpark. Voor het reduceren van klimaatveranderende emissies is dit positief, maar effect op het klimaat niet zichtbaar. Eerste gevolgen klimaatverandering werden aan einde periodewereldwijd zichtbaar. Aandeel biobrandstoffen blijft beperkt door enkel bijgemengde vorm. Waterstof wordt zo goedkoop mogelijk geproduceerd, dus voornamelijk fossiele bronnen.	Onderzoek van de FCEV-auto richt zich op het verbeteren van de eigenschappen van de voertuigen en de kostprijs. In 2020 gaan demonstratieprojecten met waterstofvoertuigen van start. Bij transferia in Amsterdam krijgen mensen de mogelijkheid om hun auto te parkeren en gratis een FCEV-auto te gebruiken in de stad. AVG wordt verder gedemonstreerd op afgesloten trajecten voor hoogwaardig openbaar vervoer (Utrecht Centrum - Utrecht Uithof).

Tabel D.2: Skelet scenario 1 - periode 2 (2015 - 2025)

Nieuwe koppelingen	Regime Ontwikkelingen	Probleem Ontwikkelingen	Niche Ontwikkelingen
Met de komst van waterstof en de biobrandstoffen zijn er alternatieve (en klimaatvriendelijkere) brandstoffen beschikbaar. Vanuit het landschap en het regime wordt de aankoop van deze brandstoffen verder gestimuleerd door de introductie van een klimaataccijns op de brandstoffen. Druk vanwege klimaatverandering (door eerste zichtbare effecten) en de voldoende ontwikkelde FCEV-auto leiden tot commercieel gaan FCEV-auto vanaf 2025.	Politiek nog steeds geen bereidheid tot investeren in kostenintensieve maatregelen. Lokale overheden breiden parkeerplekken in woonwijken niet uit, wegens ruimtegebrek en leefbaarheid niet verminderen. Controle op goed / fout parkeren in woon-wijken intensiever. Overlast SUV in de stad verder beperken door verhoging parkeer-tarieven en gebruik maken van kleinere wegen naar centrum van de stad. Tussen grotere steden beperkte H2-infrastructuur ontstaan waardoor voor kleinere gemeenten goedkoper om ook FCEV-bussen in hun steden te stimuleren. Komst FCEV-auto versnelt verdere uitbreiding van de H2-infrastructuur. Aanscherping van de [G&L]-normen i.c.m. de inwerkingtrede van de [CO2]-normen maken ICE-voertuigen te duur voor massamarkt. Popula-riteit daalde en ICE wordt uit hoofdaanbod fabrikanten geschrapt. Door [CO2]-normen werd het voor HEV-voertuigen ook nodig add-on technologie te gebruiken, daardoor HEV langzaam duurder aan het worden. FCEV-voertuigen krijgen betere concurrentiepositie. Stijgende olieprijs maakt aantrekkelijker om waterstof uit niet fossiele bronnen te produceren. Bij fossiele brandstoffen toename bijmenging met biobrandstoffen naar maximum.	Congestie op het HWN verslechterde en vertaalde zich naar de eerste tekenen van economische schade, doordat steeds meer wegen last kregen van permanente congestie. Aanhoudende congestie leidde ertoe dat reizigers gingen overstappen van auto naar OV Door beperkte parkeerplaatsen moest auto steeds verder van huis geparkeerd worden. Bewoners lieten auto vaker thuis staan om deze bij de hand te hebben. Nut extra auto verdween hiermee. Ondanks positieve ontwikkelingen in het regime blijven effecten van de klimaatverandering toenemen. In deze periode HEV dominant, maar populariteit dalende (stijgende brandstofprijzen en verkoopprijs i.c.m. introductie FCEV) Vraag naar fossiele brandstoffen daalt door stijgend aandeel biobrandstoffen en klimaatvriendelijkere productie van waterstof. Olieprijs begint te dalen. Prijs biobrandstoffen stijgt door beperkte productiemogelijkheden.	Demonstratie van AVG op aparte stroken langs de A2 (op locaties waar nu aparte betaalstroken liggen in de buurt van Amsterdam)

Tabel D.3: Skelet scenario 1 - periode 3 (2025 - 2035)

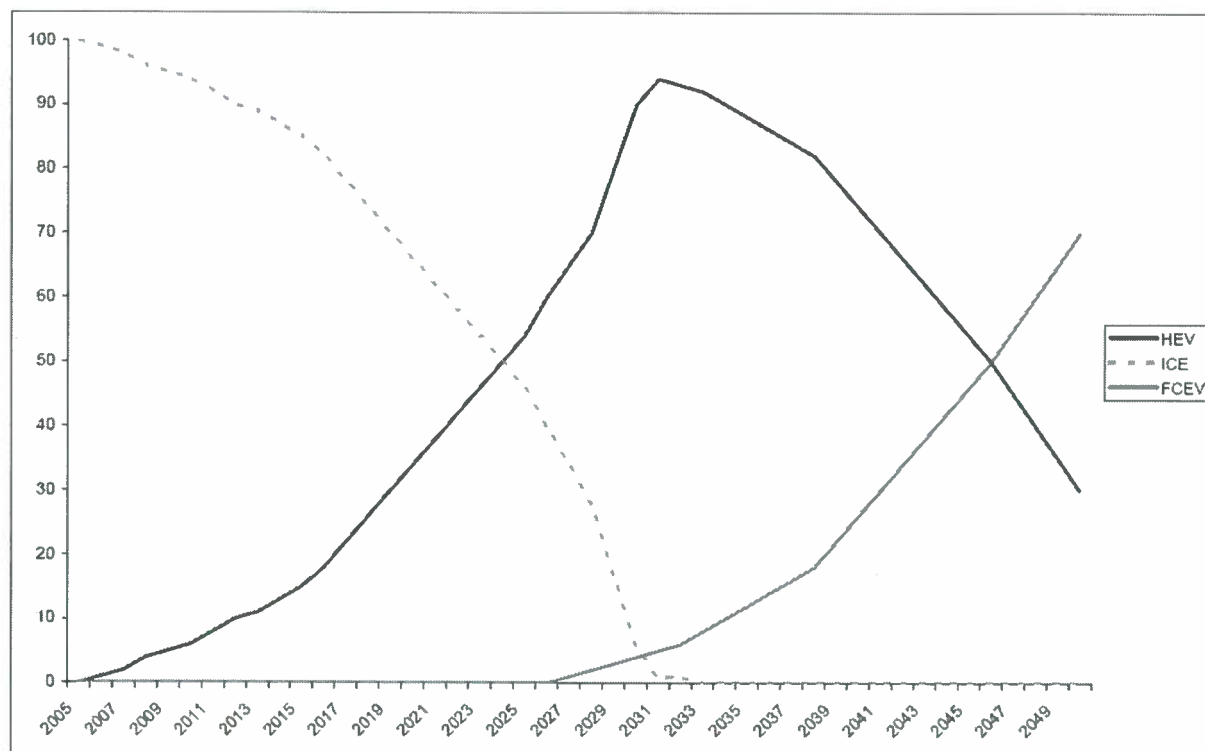
Nieuwe koppelingen	Regime Ontwikkelingen	Probleem Ontwikkelingen	Niche Ontwikkelingen
Economische schade van congestie leidt tot de bereidheid om te investeren in de aanleg van AVG stroken. Actoren helpen mee met investering vanuit winsttoegmerk of eigen belang.	Deel automobilisten maakt gebruik van AVG stroken, omdat deze op drukke momenten een betrouwbare reistijd bieden die sneller is dan het alternatief. Lokale overheden veranderden in deze periode hun beleid nauwelijks meer. Op milieugebied worden de normeringen verder aangescherpt en de diverse heffingen verder verhoogd om zo klimaatvriendelijke voertuigen verder te stimuleren. Dalende olieprijs i.c.m. duurdere biobrandstoffen leiden tot verlaging aandeel biobrandstoffen in brandstoffen. Waterstofproductie uit biomassa verschuift deels naar fossiele bronnen.	Doordat deel van de automobilisten gebruik gaat maken van AVG stroken neemt de congestie op de rest van het HWN af en verbeterd de doorstroming aldaar. Dit leidt ertoe dat mensen die in de vorige periode overgestapt waren naar OV weer terug gingen naar de auto. Aan het eind van deze periode rijden in alle steden brandstofcellussen. Een deel van het busspark bestaat nog uit normale fossiele brandstofbussen, maar deze verdwijnen via natuurlijke weg het busspark. In deze periode begint het aandeel van de HEV-voertuigen sterk af te nemen. FCEV-voertuigen worden dominant in het nieuwe wagenpark en naar de toekomst gezien wordt hiermee een positieve trend gezet naar een klimaatvriendelijk personenvervoer. Door het steeds meer wegvallen van voertuigen die fossiele brandstoffen nodig hebben daalt de vraag naar olie. Dit resulteert erin dat de olieprijs langzaam gaat zakken. Op het gebied van klimaatverandering beginnen de effecten te stabiliseren door onder andere de positieve trend in het personenvervoer.	

Tabel D.4: Skelet scenario 1 - periode 4 (2035 - 2050)

Overzicht van verschillende ontwikkelingen in scenario 1

	2005	2015	2025	2035	2050
Individueel vervoer	76%	79%	82%	80%	81%
Collectief vervoer	12%	9%	6%	8%	7%
Overige (fietsen, lopen,...)	12%	12%	12%	12%	12%

Tabel D.5: Verhouding individuele, collectieve en overige vervoersvormen



Figuur D.1: Samenstelling wagenpark naar technologie (overzicht per jaar)

	2005	2015	2025	2035	2050
ICE	100%	94%	68%	17%	nihil
HEV	nihil	6%	32%	79%	55%
FCEV	0%	0%	nihil	4%	45%

Tabel D.6: Samenstelling wagenpark naar technologie

Energiebron	2015	2025	2035	2050
Zon, wind, water	30%	40%	25%	30%
Biomassa	30%	40%	15%	15%
Fossiel	40%	20%	60%	55%

Tabel D.7: Waterstof naar energiebron

Nieuwe koppelingen	Regime Ontwikkelingen	Probleem Ontwikkelingen	Niche Ontwikkelingen
Vanuit overheid wenselijk om de wegenbelasting voor individuele voertuigen te koppelen aan het daadwerkelijke weggebruik: invoeren rekeningrijden bestaande uit kilometer- en spitsheffing (2008 aanleg, 2010 in gebruik). Brandstofcellussen verbeteren lokaal leefbaarheid en bereikbaarheid, voor OV kwaliteitsverbetering. Na afloop 2CUTE brandstofcellussen commercieel. Biobrandstoffen vanaf 2006 bijgemengd aan de pomp verkrijgbaar (resultaat wens klimaatvriendelijkere brandstoffen en niche). Vanwege toenemende problematiek, en succes Londen, begint Rotterdam met invoer Congestion Charge (2010).	Congestiestrijding door optimalisatie en expansie infrastructuur HWN. Observatiesystemen verbeteren en koppelen aan informatiesystemen voor snelste reistijd deur tot deur. Sneller en adequater reactie op verstoringen. OV essentieel gezien voor doorstroming, maar OV commercieel. Kwaliteit OV wordt verbeterd maar met winstoogmerk. Onrendabele lijnen geschrapt en tarieven verhoogd. SUV-overlast neemt (lokaal) toe (lawaaï, ruimtebeslag, onveiligheid). In 2CUTE steden brandstofcellussen blijven rijden met steun lokale overheden (reden: leefbaarheid+, kwaliteit OV+) HEV aantrekkelijker door fiscaal voordeel en stijgende brandstofprijzen). Vanaf 2007 elke autofabrikant HEV-model in het assortiment zitten. Verkoop biobrandstoffen stimuleren met accijnsvoordeel naar ratio aandeel biobrandstoffen in de brandstof. Op het gebied van [G]-emissies werden de normen verder aangescherpt. Inkomsten Congestion Charge naar verbetering OV: extra FCEV-bussen, reistijden op korte afstand verbeteren.	Verbetering doorstroming maar groeiende mobiliteit leidt tot congestie toename. OV-aandeel relatief dalende (te duur tijdsinefficiënt, onbetrouwbaar of niet beschikbaar). Aantal absolute reizigerskilometers met OV constant. Individueel vervoer aandeel stijgend. Optimalisatie infrastructuur focus op het HWN. Andere delen weggelaten nauwelijks aangepakt en daar nam de congestie toe. Zichtbaar door verbeterde observatie weggelaten. Lokale verbeteringen van de leefbaarheid door brandstofcellussen wekt interesse kleinere steden. De overlast van SUV-voertuigen creëert draagvlak voor maatregelen. Aan het begin van de periode onvoldoende ontwikkelde alternatieven voor duurzamer vervoer. Aan het einde HEV en biobrandstoffen voldoende ontwikkelde alternatieven. In Rotterdam eerste effecten Congestion Charge merkbaar. Reizigers stappen over bij transferia. Bereikbaarheid, leefbaarheid en kwaliteit OV steeg. Andere grote steden zien positieve effecten congestion charge.	Wegens gebrek lange termijn alternatieven fossiele brandstoffen onderzoek naar waterstoftechnologie gestimuleerd. Focus op kostenverlaging technologie en verbeteren opslag voor waterstof. Daarnaast demoprojecten opzetten. Brandstofcellussen in CUTE succesvol gedemonstreerd (2003 - 2006). Opvolging door 2CUTE (2006 - 2012), focus op lange termijn prestaties bussen en kosten efficiënt uitbreiden waterstofinfrastructuur. Daarnaast bussen vloot vergroot om H2-infrastructuur rendabeler te maken. In 2012 internationale richtlijnen vastgelegd voor commerciële toepassingen met waterstoftechnologie. Na afloop 2CUTE in 2012 gaan brandstofcellussen commercieel traject in. FCEV-auto's verder ontwikkelen (prijs brandstof en opslag in combinatie met actieradius). Sinds eind 2004 werd Automatische Voertuig Geleiding gedemonstreerd in de vorm van Hoogwaardig Openbaar Vervoer tussen het centrum van Eindhoven en het nabijgelegen vliegveld.

Tabel D.8: Skelet scenario 2 - periode 1 (2005 - 2015)

Nieuwe koppelingen	Regime Ontwikkelingen	Probleem Ontwikkelingen	Niche Ontwikkelingen
Overlast van SUV voertuigen lokaal en de druk om de leefbaarheid te verbeteren leiden tot invoering van variabele parkeertarieven afhankelijk van ruimtebeslag. Onder invloed van druk uit het landschap en de aanwezigheid van alternatieven (HEV) vanaf 2020 klimaatheffing bij aanschaf voertuig (gekoppeld aan energielabel). Voertuigen klimaatvriendelijker maken door aankondiging [CO₂]-emissienormen (van kracht in 2030). Duurzame productie waterstof van begin af aan stimuleren met productieheffing afhankelijk van energiebron. Pompprijs H₂ onafhankelijk energiebron, producent krijgt keuze voor meer / minder winst. AVG voertuigen op afgesloten traject gaan commercieel traject in als vorm van Hoogwaardig Openbaar Vervoer.	Aansluiting HWN op rest infrastructuur optimaliseren en expanderen. Spitsheffing verhogen om rijden in de spits verder te ontmoedigen Geen politiek animo voor landelijke sturing reiziger in vervoerskeuze door slechte ervaringen met modal shift. Lokale overlast SUV werd tegen gegaan door introductie variabele parkeertarieven. Aanscherping van de [g]-normen leidt ertoe dat ICE-voertuigen duurdere add-on technologieën nodig hebben. ICE wordt duurder. Aandeel biobrandstoffen in fossiele brandstoffen groeit beperkt doordat productieheffing op waterstof de prijs van biomassa doet stijgen. Aantal steden met FCEV-bussen groeit vanwege positief effect in grotere steden. Dus verdere uitbreiding van de H₂-infrastructuur. A'dam, Den Haag, Utrecht gaan congestion charge beleid Rotterdam kopiëren, omdat eigen beleid niet werkt en R'dam succes boekt (2020) R'dam begint met aanleg AVG-trajecten op drukste routes.	Congestie neemt toe, ondanks verbeteringen infrastructuur (oorzaak mobiliteitsgroei), bepaalde plekken in Randstad gedurende gehele dat files. Variabele parkeerplaatsen leidde tot vermindering van SUV-auto in de stad. in combinatie met congestion charge algehele afname auto in stad merkbaar en stijging OV-aandeel. Eerste mensen in R'dam kiezen voor volledig met OV reizen. Steden zonder congestion charge zien aantal auto's stijgen en parkeerproblemen in woonwijken ontstaan. Populariteit HEV stijgt door prijs\voordelen. HEV dominant in nieuw wagenpark. Rond Rotterdam stagneert groei wagenpark. Aandeel biobrandstoffen blijft beperkt door enkel bijgemengde vorm. Waterstofproductie focust op duurzame door productieheffing. Toename van efficiëntere voertuigen in combinatie met toename biobrandstoffen en duurzame productie waterstof leidt tot lichte afname vraag naar fossiele brandstoffen. Dreigende uitputting goedkope oliebronnen laten olieprijs langzaam verder stijgen. Reductie [CO₂]-emissies, maar effect niet direct zichtbaar. Effecten klimaatverandering wereldwijd zichtbaar.	Onderzoek van de FCEV-auto richt zich op het verbeteren van de eigenschappen van de voertuigen en de kostprijs. In 2020 gaan demonstratieprojecten met waterstofvoertuigen van start. In A'dam wordt de taxivloot uitgerust met een aantal FCEV-auto's.

Tabel D.9: Skelet scenario 2 - periode 2 (2015 - 2025)

Nieuwe koppelingen	Regime Ontwikkelingen	Probleem Ontwikkelingen	Niche Ontwikkelingen
Met de komst van waterstof en de biobrandstoffen zijn er alternatieve (en klimaatvriendelijkere) brandstoffen beschikbaar. Vanuit het landschap en het regime wordt de aankoop van deze brandstoffen verder gestimuleerd door de introductie van een klimaataccijns op de brandstoffen. De druk om de klimaatverandering tegen te gaan (en de eerste zichtbare effecten van de klimaatverandering) en de verder ontwikkelde FCEV-auto leiden ertoe dat vanaf 2025 de FCEV-auto commercieel beschikbaar komt.	In randstad effecten modal shift grote steden merkbaar. Effect in Randstad stimuleren door sterke vergroting spitsheffing. Extra inkomsten investeren in OV tussen grote steden verbeteren. Grotere steden buiten Randstad gaan ook congestion charge invoeren. In Randstad wordt OV verder verbeterd. Tussen grotere steden was al een grove infrastructuur ontstaan waardoor het goedkoper werd voor kleinere gemeenten om ook brandstofcellbussen in hun steden te stimuleren. Komst FCEV-auto versnelde de verdere uitbreiding van de waterstofinfrastructuur. Aanscherping van de [G&L]-normen in combinatie met de inwerkingtrede van de [CO₂]-normen maken ICE-voertuigen te duur voor massamarkt. Populariteit daalde en ICE wordt uit hoofdaanbod fabrikanten geschrapt. [CO₂]-normen werd het voor HEV-voertuigen ook nodig add-on technologie te gebruiken, daardoor HEV langzaam duurder aan het worden. FCEV-voertuigen krijgen betere concurrentiepositie. Vergroten productieheffing voor waterstofproducenten om duurzaamheid te bevorderen.	In randstad langzame stijging in mensen die volledig OV gebruiken voor vervoer. Auto krijgt beperkt nut met name voor reizen buiten de randstad. Verkoop nieuwe auto's daalt, waardoor wagenpark kleiner wordt. Congestieprobleem in Randstad neemt langzaam af. Effect buiten Randstad van Congestion Charge kleiner doordat afstanden tussen steden veel groter zijn. Waterstof wordt zo klimaatvriendelijk mogelijk geproduceerd waardoor deze goedkoper wordt dan fossiele brandstoffen. FCEV-voertuigen worden aantrekkelijker t.o.v. HEV. Ondanks positieve ontwikkelingen in het regime blijven de effecten van de klimaatverandering toenemen. In deze periode met name de HEV nog dominant, maar populariteit begint af te nemen door de stijgende brandstofprijzen en het langzaam duurder worden van de voertuigen (door aanscherping van de normen).	

Tabel D.10: Skelet scenario 2 - periode 3 (2025 - 2035)

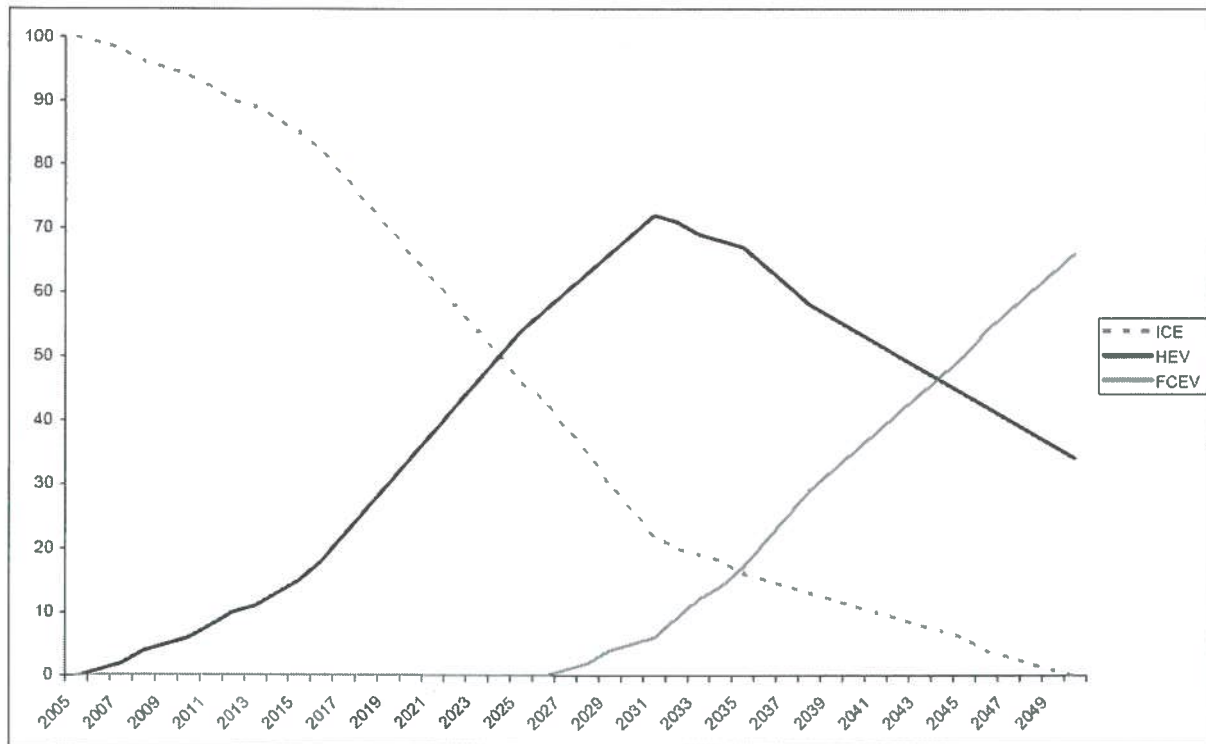
Nieuwe koppelingen	Regime Ontwikkelingen	Probleem Ontwikkelingen	Niche Ontwikkelingen
	Modal Shift buiten Randstad bevorderen door extra verhoging spitsheffing. Extra inkomsten naar projecten voor collectieve vervoersvormen. Op milieugebied worden de emissienormen verder aangescherpt en de diverse heffingen verder verhoogd om zo aankoop FCEV i.p.v. HEV verder te stimuleren. Daarnaast productieheffing op waterstof verder vergroten.	Verplaatsingen binnen Randstad voornamelijk via OV. Buiten Randstad blijft auto nog belangrijk. Daling in aantal auto's te zien. Dit leidt tot een afnemende vraag naar brandstof en daarmee tot een dalende brandstofprijs.	

Tabel D.11: Skelet scenario 2 - periode 4 (2035 - 2050)

Overzicht van verschillende ontwikkelingen in scenario 2

	2005	2015	2025	2035	2050
Individueel vervoer	76%	79%	79%	73%	66%
Collectief vervoer	12%	9%	9%	15%	22%
Overige (fiets, lopen,...)	12%	12%	12%	12%	12%

Tabel D.12: Verhouding individuele, collectieve en overige vervoersvormen



Figuur D.2: Samenstelling wagenpark naar technologie (overzicht per jaar)

	2005	2015	2025	2035	2050
ICE	100%	94%	68%	39%	10%
HEV	nihil	6%	32%	57%	50%
FCEV	0%	0%	nihil	4%	40%

Tabel D.13: Samenstelling wagenpark naar technologie (einde periode)

	2015	2025	2035	2050
Zon, wind, water	20%	25%	30%	35%
Biomassa	20%	40%	45%	50%
Fossiel	60%	40%	30%	25%

Tabel D.14: Waterstof naar energiebron

Bibliografie

- Achterhuis, H. and B. Elzen (1998). *Cultuur en Mobiliteit*. Den Haag: Rathenau Instituut.
- Adviesdienst Verkeer en Vervoer (2000). *Concurrentie tussen auto en openbaar vervoer*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Adviesdienst Verkeer en Vervoer (2003). Kostenbarometer 1980 - 2000. <http://www.socialestaat.nl/2003/8.4/index.html> (05-05-2005).
- Autogas (2004). *De site van Stichting Autogas Nederland*. <http://www.autogas.nl> (17-06-2004).
- Avadikyan, A., P. Cohendet, and J.-A. Héraud (2003). *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies*. Berlin: Springer-Verlag.
- Ballard Power Systems (2004). *Ballard Power Systems*. <http://www.ballard.com/> (15-12-2004).
- Berg, B. v. d. (2004). *Het Dossier: Waterstof - belofte van de 21ste eeuw*. *De ingenieur* 116(2), 20-27.
- Bosch, S. v. d., E. Molin, J. Hemmes, J. L. Zachariah, A. Patil, C. Chorus, W. Boon, and N. Dragutinovic (2004). *Public Acceptance of Hydrogen in the Netherlands - Results of a Survey*. Technical report, Delft University of Technology.
- BOVAG (2004). *Mobiliteit in cijfers*. <http://www.bovagrai.nl/> (18-05-2004).
- Brain, M. (2004a). *How Car Engines Work*. <http://auto.howstuffworks.com/engine.htm/printable> (17-06-2004).
- Brain, M. (2004b). *How Diesel Engines Work*. <http://auto.howstuffworks.com/diesel.htm/printable> (17-06-2004).
- British Petroleum (2004). *Statistical Review of World Energy 2004*. <http://www.bp.com/subsection.do?categoryId=95&contentId=2006480> (10-04-2005).
- CBS (2004). *CBS Statline*. <http://statline.cbs.nl/> (10-04-2005).
- De Ingenieur (2004a). *Autobanden stiller*. *De Ingenieur* 116(3), pp. 9.
- De Ingenieur (2004b). *Productie Waterstof Goedkoper*. *De Ingenieur* 3(116), pp. 11.
- de la Bruheze, A. (2005, 2005). Interview.

- De Verkeersinformatiedienst (2004). *De Verkeersinformatiedienst*.
<http://www.verkeersinformatiedienst.nl/> (10-05-2004).
- Dikmans, A. (2004, 5-11-2004). Interview.
- Elzen, B. (2005, 2005). Interview.
- Elzen, B., F. Geels, and P. Hofman (2002). *Sociotechnical Scenarios (STSc) : A new Methodology to Explore Technological Transitions*. Enschede: University of Twente - Centre for Studies of Science, Technology and Society.
- Elzen, B., F. Geels, and P. Hofman (2004). *Sociotechnische Scenario's als hulpmiddel voor transitiebeleid - Een illustratie voor het domein van personenmobiliteit*. Te verschijnen in: Milieubeleid, technologische ontwikkeling en de Nederlandse economie.
- Elzen, B., R. Hoogma, and J. Schot (1996). *Mobiliteit met toekomst*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- EMIS (2004). *Emissiewetgeving*. <http://www.emis.vito.be/autoverbruik/index.asp?pageChoice=Emissiewetgeving&Bc=Verkeer> (10-04-2005).
- European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (2006). HFP Infotools.
<http://www.infotools.hfpeurope.org/> (05-02-2006).
- Europees Parlement (2003). Richtlijn 2003/30/EG van het Europees Parlement en de Raad van 8 mei 2003 ter bevordering van het gebruik van biobrandstoffen of andere hernieuwbare brandstoffen in het vervoer.
<http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32003L0030:NL:HTML> (24-04-2005).
- Ford (2004). *Ford :: home*. <http://www.ford.nl> (19-09-2004).
- Fuel Cell Bus Club (2004). *Fuel Cell Bus Club*.
<http://www.fuel-cell-bus-club.com/> (19-09-2004).
- Fuel Cells (2004). *The Online Fuel Cell Information Resource*.
<http://www.fuelcells.org/> (19-09-2004).
- Garvelink, B. (2004a). *Stugge strijd voor schone diesels*. *De Ingenieur* 116(3), 40 – 43.
- Garvelink, B. (2004b). *Test Toyota Prius en Honda Civic IMA*. *De Ingenieur* 116(10), 30 – 33.
- Geels, F. (2002a). *Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study*. *Research Policy* 31, pp. 1257–1274.
- Geels, F. (2002b). *Understanding the Dynamics of Technological Transitions, A co-evolutionary and socio-technical analysis*. Enschede: University of Twente - Centre for Studies of Science, Technology and Society. ISBN 9-03-651797-4.
- Gemeente Eindhoven (2005). Phileas: Een nieuwe manier van reizen. www.phileas.nl (04-05-2004).

- Goldewijk, K. K., J. Olivier, J. Peters, P. Coenen, and H. Vreuls (2004). *Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2002*.
http://www.rivm.nl/milieu/emissies_afval/nir2004-NL.jsp (19-09-2004).
- Gruijl, D. d. (2005). *Auto van de toekomst redt milieu en economie*. (4-06-2005)
 Utrecht: Utrecht Nieuwsblad.
- GVB (2004). *Brandstofcelbussen in Amsterdam*.
<http://www.gvb.nl/projecten/tekst-brandstofcelbus.htm> (06-02-2004).
- Hoed, R. v. d. (2004a). *Driving Fuel Cell Vehicles - How Established Industries React to Radical Technologies*.
<http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/hoed/index.html>.
- Hoed, R. v. d. (2004b, 29-10-2004). Interview.
- Hoof, H. v. (2001). *Het Nationaal Verkeers- en Vervoersplan 2001 - 20202 (Samenvatting)*. <http://www.vhoof.nl/auto/nvvp3stekst.html> (27-02-2004).
- Hoogma, R. (2005, 29-11-2005). Interview.
- Hoogma, R., R. Kemp, J. Schot, and B. Truffer (2002). *Experimenting for Sustainable Transport: The approach of Strategic Niche Management*. Routledge.
- Hydrogen Now (2004). *Hydrogen Facts / Safety*.
<http://www.hydrogennow.org/Facts/Safety-1.htm> (29-11-2004).
- Keulemans, M. (2004). *IJs met prik - buitenaards poolijs als brandstof*. <http://noorderlicht.vpro.nl/wetenschap/index.shtml?3626936+4257491+15861616> (19-09-2004).
- Mallant, R. (2004, 27-10-2004). Interview.
- Mazda (2004). >>> Mazda-----ZOOMZOOM>>>. www.mazda.nl (10-04-2005).
- Milieu Centraal (2004). *Auto kopen*.
<http://www.milieucentraal.nl/onderwerp/set?onderwerp=Auto%20kopen> (21-09-2004).
- Milieuloket (2004a). *Broeikaseffect*.
<http://www.milieuloket.nl/9292000/modulesf/vfz0qpqn1000> (19-09-2004).
- Milieuloket (2004b). *Milieuloket*. <http://www.milieuloket.nl> (19-09-2004).
- Milieuloket (2005). *Externe veiligheid*.
<http://www.milieuloket.nl/9292000/modulesf/vfz6g9r00000> (13-10-2005).
- Ministerie van Financiën (2004). *Feiten over belasting op brandstof*. http://www.minfin.nl/DEFAULT.ASP?CMS_ITEM=MFCR2C007E07656BC11D5BFDC00104B3FBE32 (19-09-2004).
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1997). *7 Trends - mobiliteit in veranderend Nederland*. <http://www.rws-avv.nl/vv2020/literatuur/7trends.htm> (27-02-2004).

- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1999). *Perspectief op cijfers - enkele feiten over verkeer en vervoer op een rij*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2001). *Perspectief op auto/OV - de keuze van de reiziger*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2004). *Nota Mobiliteit*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Ministerie van VROM (2004a). *Dossier Klimaatverandering*.
<http://www.vrom.nl/pagina.html?id=9228#5> (27-02-2004).
- Ministerie van VROM (2004b). *Emission Monitoring of Greenhouse Gases in the Netherlands*. <http://www.broeikasgassen.nl/> (27-04-04).
- Ministerie van VROM (2005). *Brandstofverbruikboekje*. Den Haag: Ministerie van VROM.
- Mols, B. (2004). *Het Dossier: Rekeningrijden - Uniform systeem voor 25 landen*. *De ingenieur* 116(3), pp. 18-25.
- Mom, G. (2004). *SUV's zetten kwalijke trend*. *De Ingenieur* 5(116), pp. 29.
- National Geographic (2004). *Olie - waar zit het en hoeveel is er nog over?* *National Geographic* 2004(Juni), pp. 12-13.
- National Hydrogen Association (2004). *Hydrogen Fact Sheet*.
<http://www.hydrogenassociation.org/nha-factsheet.asp> (09-12-2004).
- Natural Welfare (2003). *Overbevolking - bevolkingsdichtheid*, howpublished =
"http://www.ecologiebibliotheek.nl/bevolkingsdichtheid.htm (19-09-2004).
- Nederlandse Waterstof Vereniging (2004). *H2 Waterstof.Org Home*.
<http://www.waterstof.info> (09-12-2004).
- NRC Handelsblad (2005). *Dossier Rekeningrijden*.
<http://www.nrc.nl/W2/Lab/Rekeningrijden/inhoud.html> (04-05-2005).
- NWO (2001). *Gebruik en waardering van vervoersnetwerken*, Brochure Connekt/NWO Stimuleringsprogramma Verkeer en Vervoer. <http://www.nwo.nl/> (04-05-2005).
- OPEC (2004). *Organization of the Petroleum Exporting Countries*.
<http://www.opec.org/> (09-12-2004).
- Rijkswaterstaat (2004). *Rijkswaterstaat - Wegen*.
<http://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/> (18-05-2004).
- RIVM (2004a). *Maatschappelijke respons*. Bilthoven: KNNV, pp. 225-247.
- RIVM (2004b). *Milieubalans 2004 - Het nederlandse milieu verklaard*. Bilthoven: RIVM, ISBN 9-06-960109-5.
- RIVM (2004c). *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu*. <http://www.rivm.nl> (20-05-2004).

- RIVM (2004d). *Verkeer en Vervoer*. IN: Milieucompendium 2004, pp. 62-71. Bilthoven: KNNV, ISBN 9-03-5724992.
- Schultz, P. (2003). *Gearing Up for the Switch*. *Linde Technology 2003*(2), pp. 44-47.
- Shell (2004). *Shell in Nederland*. <http://www.shell.nl> (03-06-2004).
- Smits, M. (2002). *Monsterbezweering*. Amsterdam: Uitgeverij Boom. ISBN 9-05-35282-8.
- Sperling, D. and J. S. Cannon (2004). *The hydrogen energy transition - moving toward the post petroleum age in transportation*. Londen (1): Elsevier Academic Press, ISBN 0-12-656881-2.
- Steingröver, A. and R. Krevet (2005). *Autoshuttle Index*. <http://www.autoshuttle.de/> (07-06-2005).
- Toyota (2005). *Toyota*. <http://www.toyota.nl> (21-04-2005).
- Transport for Londen (2004). *Transport for Londen Home*. <http://www.tfl.gov.uk/tfl> (23-06-2004).
- US Department of Energy (2003). *Office of Fossil Energy Hydrogen Program Plan*. <http://www.fossil.energy.gov/programs/fuels/hydrogen/programplans/2003/fehhydrogenplan2003.pdf> (25-12-2004).
- US Department of Energy (2004a). *FreedomCAR & Vehicle Technologies Program*. <http://www.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/> (15-12-2004).
- US Department of Energy (2004b). *Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program*. <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells> (15-12-2004).
- US Department of Energy (2004c). *The Hydrogen Future*. <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/future/> (15-12-2004).
- Van A naar Beter (2003). *Brochure Sociale Veiligheid in het Openbaar Vervoer*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Van A naar Beter (2004). *Van A naar Beter*. <http://www.vananaarbeter.nl> (27-02-2004).
- Wassink, J. (2004). *Waterstof on the rocks - nieuwe uitweg voor opslagprobleem*. <http://www.vpro.nl/wetenschap/index.shtml?3626936+4257491+18790496> (19-09-2004).
- Wegen naar de Toekomst (1998). *Toekomstbeelden - Automatische Voertuiggeleiding in 2027*. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Wikipedia (2005). *LPG Wikipedia, the free encyclopedia*. <http://nl.wikipedia.org/wiki/LPG> (13-10-2005).
- Wit, H. d. (2004, 18-11-2004). Interview.
- World Commission on Environment and Development (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- Zuidgeest, L. (2004, 8-11-2004). Interview.

