

NOVEMBER 1989

ESC-52

**KANSEN VOOR ALTERNATIEVE BRANDSTOFFEN
IN HET WEGVERKEER IN NEDERLAND TOT 2020
ONDER INVLOED VAN DE OLIEPRIJS, NO_x- EN CO₂-PLAFONDS**

**T. KRAM
P.A. OKKEN**

VOORWOORD

Deze scenariostudie werd uitgevoerd met subsidie van NOVEM (Nederlandse maatschappij voor energie en milieu BV, Sittard/Utrecht). Vanuit NOVEM werd de studie begeleid door C. Douma en F.W. van Spanje.

SUMMARY

Impacts of environmental and oil-price constraints on alternative automotive fuels and vehicles

The Energy Study Centre of Netherlands Energy Research Foundation has designed a set of energy scenarios to evaluate the role of emerging energy technologies and fuels up to the year 2020 in order to support energy R&D policy. The possible future penetration of a few hundred different energy technologies and fuels, including alternative automotive fuels, are assessed in this study. Scenario calculations are made with the IEA-MARKAL model. This process-oriented national-cost-minimizing dynamic LP-model can be used to test future energy technologies for R&D policy purposes. Sensitivity analyses are performed with respect to energy prices and environmental constraints. This scenario study is sponsored by the Netherlands Agency for Energy and the Environment (NOVEM).

Current use of automotive fuels in Western Europe is almost exclusively based on oil. Long term oil supplies being uncertain, a considerable research effort in Europe is devoted to alternative non-oil automotive fuels and vehicle development. Yet substantial oil substitution is not foreseen in the near future.

In general research-scientists tend to introduce an optimistic view in their cost estimates and market assessments. Optimistic European estimates of alternative fuels market introduction, vehicle costs and vehicle performance have been carefully evaluated (and adjusted if necessary) before use in this study. The resulting key assumptions on costs and performance of automotive fuels and vehicles are presented in the appendix.

Calculations with alternative non-oil fuels and vehicles are reported for two mobility scenarios. Sensitivity analyses are made reflecting different environmental (NO_x , CO_2) and oil-price constraints. Methanol and electric city vehicles appear to be attractive alternatives under most constraints. In some cases biofuels (ethanol, vegetable oils), stirling engines and compressed natural gas also seem to be attractive.

KEYWORDS

AIR POLLUTION ABATEMENT

AUTOMOTIVE FUELS

CARBON DIOXIDE

COMPRESSED NATURAL GAS

COMPUTER CALCULATIONS

CONSTRAINTS

ELECTRIC POWERED VEHICLES

ENERGY MODELS

ETHANOL

FORECASTING

FUEL SUBSTITUTION

HYDROGEN

M CODES

METHANOL FUELS

NITROGEN OXIDES

PETROLEUM

PRICES

<u>INHOUD</u>	<u>Blz.</u>
VOORWOORD	2
SUMMARY	3
1. INLEIDING	7
2. ALTERNATIEVE BRANDSTOFFEN EN VOERTUIGEN	9
3. SCENARIOBEREKENINGEN	13
3.1. Basisvariant	15
3.2. Variant met hogere energieprijzen	16
3.3. Variant met strenge milieu-eisen (NO _x , CO, VOS)	17
3.4. Variant met CO ₂ -milieu-eis	22
4. ONDERZOEKSAANBEVELINGEN	28
5. REFERENTIES	29
BIJLAGE	31
Technische uitgangspunten en achtergronden NOVEM- scenariostudie "Kansen voor alternatieve brandstoffen in het wegverkeer"	

1. INLEIDING

In de transportsector wordt bijna uitsluitend gebruik gemaakt van aardolieprodukten (benzine, diesel, LPG) als brandstof. Alternatieve brandstoffen worden in Nederland nog niet of nauwelijks toegepast. Toch kunnen alternatieve brandstoffen in de toekomst belangrijker worden, bijvoorbeeld vanwege verwachte toekomstige schaarste aan aardolie en stijging van energieprijzen, vermindering van de importafhankelijkheid en vermijden van nadelige milieu-effecten. Er wordt internationaal veel onderzoek verricht naar alternatieve motorbrandstoffen zoals methanol, ethanol, waterstof, elektrische auto's etc. In dit rapport staat de vraag centraal onder welke omstandigheden welke alternatieve motorbrandstoffen aantrekkelijk zijn in de Nederlandse energieuishouding. Deze vraag is van belang voor de onderzoeksprogrammering.

In dit rapport worden een aantal scenarioberekeningen besproken tot het jaar 2020. Bij deze scenarioberekeningen is gebruik gemaakt van een LP-optimalisatiemodel, dat de Nederlandse energieuishouding beschrijft vanaf de import van ruwe energiedragers tot aan het uiteindelijk gebruik van energie door individuele consumenten. Het model optimaliseert naar laagste kosten van de nationale energieuishouding en is dynamisch met perioden van 5 jaar. Op deze wijze kunnen zaken zoals de toekomstige wereld-olieprijs, milieu-eisen, technologische ontwikkelingen in de energiesector (raffinaderijen, centrales) en de ontwikkeling van nieuwe typen voertuigen in onderlinge samenhang onderzocht worden.

Emissies van luchtverontreinigende stoffen (NO_x , SO_2 , CO_2) zijn in het model opgenomen, met technieken voor emissiebestrijding. De NO_x -emissiebestrijdingstechnieken in de transportsector zijn zo gekozen dat deze in even grote mate emissies van CO en VOS bestrijden. De invloed van milieubeleid wordt gesimuleerd met landelijke emissieplafonds. Door op deze wijze de scenario's te berekenen concurreren

emissiebestrijdingstechnieken (b.v. uitlaatgaskatalysator) met energietechnologie (b.v. elektrische auto) om onder het opgelegde emissieplafond te blijven.

Om de kansen voor alternatieve motorbrandstoffen zo goed mogelijk tot uiting te laten komen is een tijdshorizon gekozen (het jaar 2020) die verder ligt dan de reikwijdte van het huidige vastgelegde energie- en milieubeleid zodat er binnen het model voldoende keuzevrijheid is, terwijl aan de andere kant de tijdshorizon (2020) nog zo dichtbij ligt dat de karakterisering van nieuwe energietechnieken en brandstoffen niet onrealistisch is.

Door het stellen van begrenzingen in het model aan de maximale en de minimale penetratiegraad en aan de introductiesnelheid van nieuwe energietechnologieën wordt een realistisch marktintroductieverloop gesimuleerd en wordt voorkomen dat een oude energietechnologie te snel uitsterft.

Het gebruikte model (MARKAL) wordt onder auspiciën van het International Energy Agency (IEA) ontwikkeld in het Energy Technology Systems Analysis Project (ETSAP). Uitwisseling van technologie-karakterisering met andere ETSAP-deelnemers en toetsing aan IEA-programma's op het gebied van technologie-ontwikkeling vinden regelmatig plaats. Het model is bij ESC in diverse studies en technologieverkenningen gebruikt, zoals de EOS-studie (Energie Onderzoek Scenario's) [1], een verkenning van de kansen voor (absorptie) warmtepompen [2] en de invloed van CO₂-milieu-eisen op nieuwe energietechnieken [3,4]. In dit rapport gaat het om de kansen voor alternatieve motorbrandstoffen.

2. ALTERNATIEVE BRANDSTOFFEN EN VOERTUIGEN

De kansen voor alternatieve motorbrandstoffen worden in dit rapport geïllustreerd met scenarioberekeningen. De transportsector in het model zoals gebruikt voor de EOS-studie [1] werd daartoe, in overleg met de opdrachtgever (NOVEM), uitgebreid met een aantal opties zodanig dat deze het volledige scala van bekende alternatieve brandstoffen omvat. De opties zijn samengevat in tabel 1.

	Kosten (fl/1000 km)	Energetisch rendement (%)	Jaar voor mogelijke marktintroductie
Personenauto's			
Benzine	217--210	16,6--23,8	
Diesel	233--228	18,6--25,2	
LPG	228--226	17,6--23,6	
CNG	280--268	18,2--23,9	1990
Methanol	228--223	17,6--23,6	1995
Ethanol	226--221	17,6--23,6	1995
Elektrische stadsauto	280--259	40--55	1995
Elektrische wisselaccu	345--289	40--50	2000
Stirling motor	280--254	21,3--26,7	2000
Waterstof	261--259	18,6--22,9	2005
Bus			
Diesel	1279--1265	20,6--25,5	
Remenergie-opslag	1309--1302	28,5--34,0	1990
CNG	1438--1400	20,1--24,0	1990
Elektrische trolley	1971--1521	70--70	1990
Elektrische accu	1559--1482	40--55	2000
Waterstof	2176--1964	31,0--32,7	2010
Vrachtauto			
Diesel	664--655	23,0--28,4	
CNG	827--792	22,6--26,7	1990
Plantenolie	753--732	24,0--28,4	1990
Methanol	697--685	23,6--28,0	1990
Methanoldissociatie	692--685	27,1--30,1	2000

Tabel 1.: Kencijfers voertuigkosten (exclusief brandstof- en milieu-kosten), energetisch rendement en mogelijk tijdstip van marktintroductie (voor onderbouwing zie bijlage) [7]

De voertuigkosten in tabel 1 omvatten alle vaste kosten rondom het voertuig (aanschaf, onderhoud, bouw van tankstations, etc.). Aangenomen is dat door technologische verbeteringen de voertuigkosten dalen en het energetisch rendement stijgt in de periode vanaf de marktintroductie tot aan het jaar 2020 (eerste resp. tweede getal in tabel 1). Het energetisch rendement is gedefinieerd als het voertuigrendement bij omzetting van brandstof of elektriciteit naar nuttige energie op de weg. Door voertuig-technische maatregelen, zoals verbetering van de motor, gebruik van lichtere materialen of verlaging van de Cw-waarde, kan het energetisch rendement verhoogd worden. Deze stijging van het energetisch rendement is optimistisch ingeschat [7]; het is best mogelijk dat de technologische ontwikkelingen langzamer verlopen en de geschatte rendementen medio 2010 en 2020 pas later gehaald worden. De auto-industrie is een internationale bedrijfstak, het gaat hier om een relatief autonome internationale ontwikkeling naar hogere rendementen, waarbij de invloed van Nederlands overheidsbeleid gering is. De voertuigkosten in tabel 1 zijn exclusief de kosten van de brandstof, brandstofvoorziening (olieraffinage, elektriciteitscentrales, etc.) en kosten voor emissiebestrijding. Deze brandstof- en milieukosten worden immers in het model zelf berekend en kunnen doorslaggevend zijn (minimale nationale kostencriterium, zie inleiding) voor het al dan niet introduceren van een verandering van brandstof. In dit soort scenariostudies is de karakterisering van kosten en rendementen in hoge mate bepalend voor de uitkomsten van de scenarioberekeningen. Hoewel de technologische onderbouwing [7] van de gegevens in tabel 1 reeds eerder is gepubliceerd is deze daarom opnieuw als bijlage bij dit rapport gevoegd.

Bij de berekening van de voertuigkosten is uitgegaan van 5% reële rente per jaar en een levensduur van 10 jaar (auto's) of 15 jaar (voor bussen en vrachtauto's). De kosten van benzine/diesel/LPG-voertuigen vormen de achtergrond; voor de kansen van alternatieve brandstoffen zijn de verschillen in voertuigkosten (tabel 1) en de verschillen in brandstof- en milieukosten van belang.

Gebruik van CNG (Compressed Natural Gas = aardgas) als brandstof voor auto en bus is een bewezen techniek die op sommige plaatsen in het buitenland (o.a. Italië, Nieuw-Zeeland) op grote schaal wordt toegepast. Ook in Nederland zijn demonstratieprojecten aan de gang [5]. De kosten van CNG-voertuigen zijn hoger dan bij benzine/diesel vanwege de grotere brandstoftank en de kosten van tankstations.

Gebruik van methanol of ethanol als motorbrandstof is eveneens een bewezen techniek. Kleine hoeveelheden (tot 5%) worden tegenwoordig aan benzine toegevoegd. In deze studie zijn de mogelijkheden voor brandstoffen die 85% of meer methanol of ethanol bevatten nagegaan.

Auto's voor 85% methanol of ethanol zijn nauwelijks duurder dan benzine-auto's. Methanol zal de komende jaren op grote schaal worden geïntroduceerd in California (VS). Methanol kan uit aardgas of steenkool (vergassing) geproduceerd worden. Bij dieselmotoren is toevoegen van methanol via katalytische dissociatie een mogelijkheid om het rendement te verbeteren. Ethanol als motorbrandstof is reeds op grote schaal geïntroduceerd in Brazilië. Ethanol wordt geproduceerd uit suikerriet. Een andere brandstof uit biomassa is plantenolie voor dieselveertuigen. Productie van ethanol of plantenolie is een mogelijkheid om de EG-landbouwoverschotten te verminderen.

Waterstof als motorbrandstof is een speculatieve optie. Waterstof kan gebruikt worden in een verbrandingsmotor of in een brandstofcel die een elektromotor aandrijft. Met beide typen voertuigen wordt geëxperimenteerd. De brandstofopslag en -zuiverheid zijn daarbij belangrijk.

De Stirling-motor voor auto's is een speculatieve optie. Een Stirling-motor kan in principe alle brandstoffen gebruiken in een extern verbrandingsproces. Voordelen zijn de geringe NO_x -emissie en het hogere rendement vergeleken met gangbare (interne) verbrandingsmotoren.

Er zijn diverse concepten voor Stirling-auto's geopperd. In deze studie is een combinatie van vrije zuiger motor/oscillerende generator/elektromotor aangenomen.

Remenergie-opslag is een mogelijkheid om het rendement van stadsbussen te verhogen. Dit is een bewezen techniek waarmee ook in Nederland inmiddels ervaring is opgedaan [5].

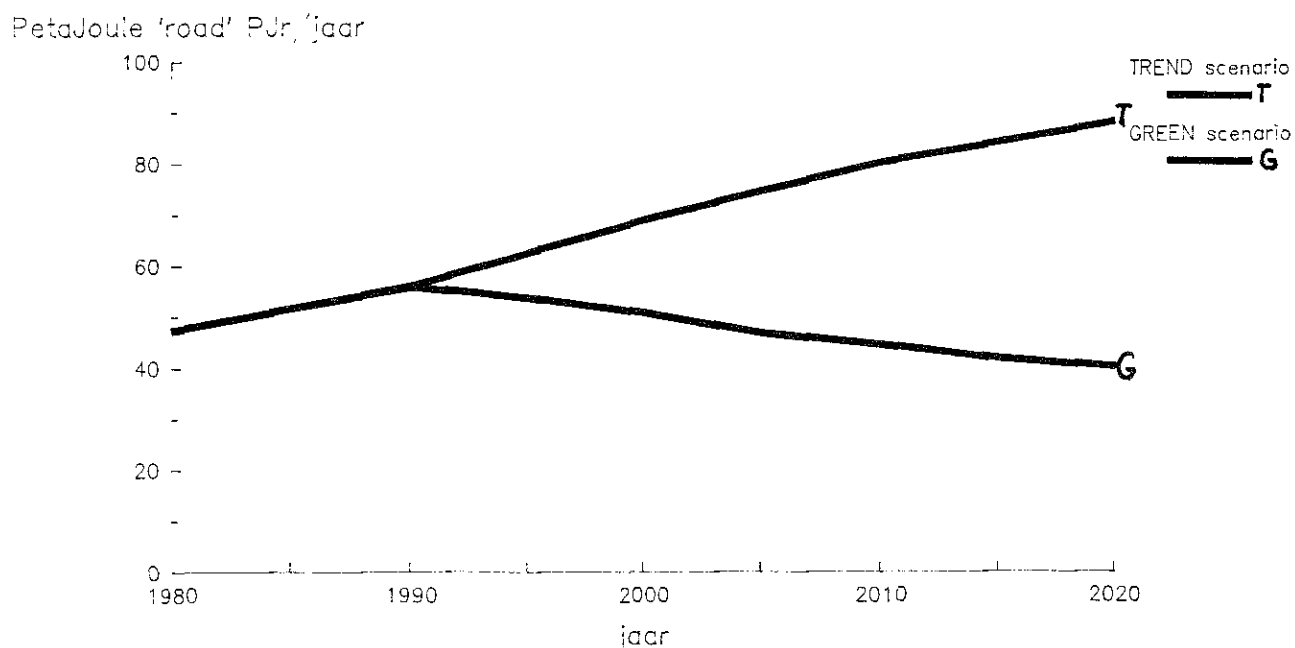
De elektrische auto is in ontwikkeling. De opslag van elektriciteit is de belangrijkste belemmering. De huidige loodaccu's hebben een beperkte opslagcapaciteit en maken de auto zwaarder. Verbeterde accu's (ZnBr, NaS, Li) zijn in ontwikkeling. Elektrische stadsauto's laden hun accu 's nachts op met goedkope nachtstroom. Verbetering van de lokale luchtkwaliteit en vermindering van geluidshinder worden gezien als belangrijke milieu-voordelen van elektrische stadsauto's [7,8]. De actieradius van deze voertuigen is gering (hooguit ca. 100 km) en daardoor zijn ze beperkt toepasbaar. Volledige overgang op elektrische auto's zou pas mogelijk zijn bij gebruik van losse accu's die onderweg bij tankstations gewisseld worden.

De elektrische bus is een bewezen techniek. Elektrische trolleybussen vergen investeringen in infrastructuur en zijn beperkt toepasbaar, in grotere steden zonder tramnet. Daarnaast zijn elektrische bussen met (verwisselbare) accu's een mogelijkheid.

In het algemeen zijn onderzoekers/ontwikkelaars van alternatieve motorbrandstoffen en -voertuigen optimistisch gestemd over de voertuigkosten, rendementen en het tijdstip van marktintroductie. In deze studie wordt het optimisme over marktintroductie gedeeld, maar worden kosten en rendementen minder optimistisch ingeschat (zie bijlage). De auto-industrie en de motorbrandstofvoorziening zijn bij uitstek internationale bedrijfstakken; de technologische uitgangspunten bij deze studie zijn niet alleen voor Nederland relevant, maar ook voor West-Europa als geheel [6].

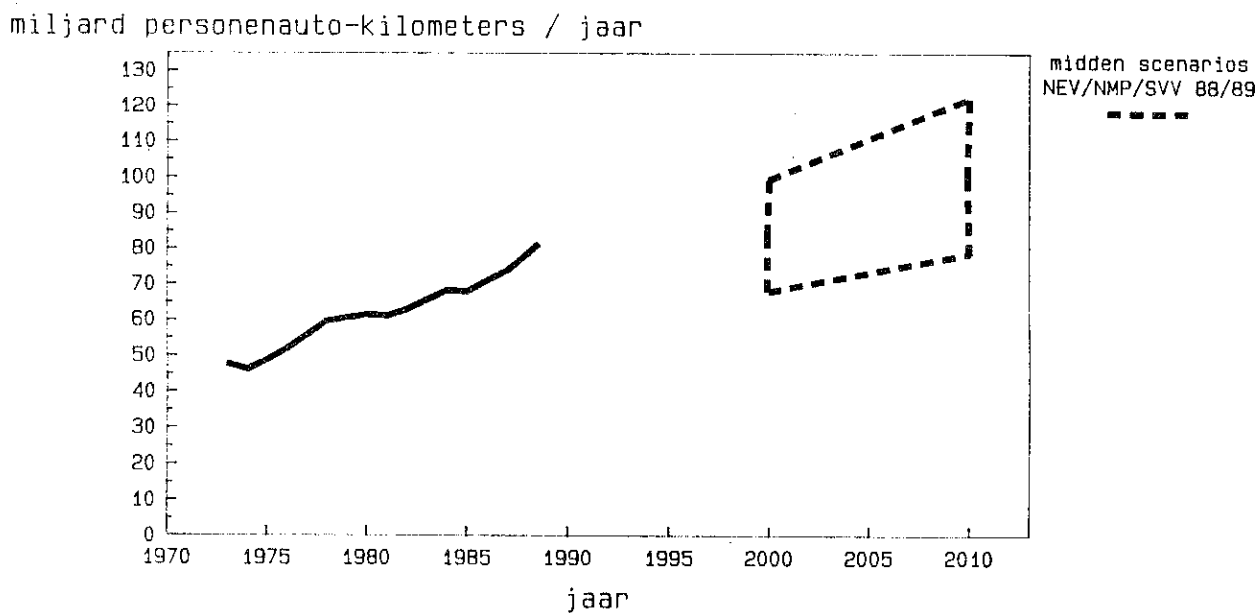
3. SCENARIOBEREKENINGEN

Bij deze modelberekeningen is gebruik gemaakt van twee energiescenario's tot 2020. Deze scenario's zijn o.a. beschreven in [1]. In het eerste scenario: Dynamiek en Groei/TREND is sprake van internationale groei en vrijhandel; in het tweede scenario: Gedeelde Ontwikkeling/GREEN staan internationale solidariteit en milieuzorg centraal. Beide scenario's vormen een afspiegeling van mogelijke wereldwijde sociaal-economische ontwikkelingen. Voor het model zijn deze vertaald naar consistente invoerparameters (economische groei, energieprijzontwikkeling, energievraagontwikkeling per sector, milieu-eisen, etc.). De ontwikkeling van de energievraag in de sector wegverkeer is te zien in figuur 1. De energievraag is onderverdeeld in personenauto's, bussen en vrachtauto's. In het TREND-scenario blijft de energievraag voor wegverkeer toenemen volgens de vigerende middenscenario's van de ministeries en het CPB. In het GREEN-scenario neemt de energievraag af door een vermindering van de transportprestatie van personenauto's als gevolg van milieubeleid.



Figuur 1.: Ontwikkeling energievraag in wegverkeer in Nederland
PJ = Peta Joule = 10^{15} J/jaar [6]

Voor de energievraagontwikkeling zijn twee karikaturaal verschillende scenario's gekozen. Gezien de technologische vraagstelling in deze studie is een precieze geaccordeerde onderbouwing van de energievraagscenario's van minder belang. Het TREND-scenario komt niettemin goed overeen met de meest recente "midden"-scenario's. Aangetekend moet worden dat nuttige energievraag (figuur 1) iets anders is dan voertuigkilometers (figuur 2). Het "rendement" van de omzetting van nuttige energie in voertuigkilometers kan verhoogd worden door o.a. file-bestrijding, verlaging maximum snelheid en vervoermiddelkeuze voor kleinere auto's of kan verlaagd worden door o.a. congestie, verhoging maximum snelheid en voortzetting van de huidige trend in de autoverkoop naar grotere auto's. Ten opzichte van de huidige situatie (1989) lijkt in dit rendement (van nuttige energie naar voertuigkilometers) een marge van hooguit $\pm 15\%$ mogelijk. In tegenstelling tot de eerder besproken voertuigtechnische rendementsverbeteringen (tabel 1) kan Nederlands verkeersbeleid hier wel duidelijk invloed hebben.

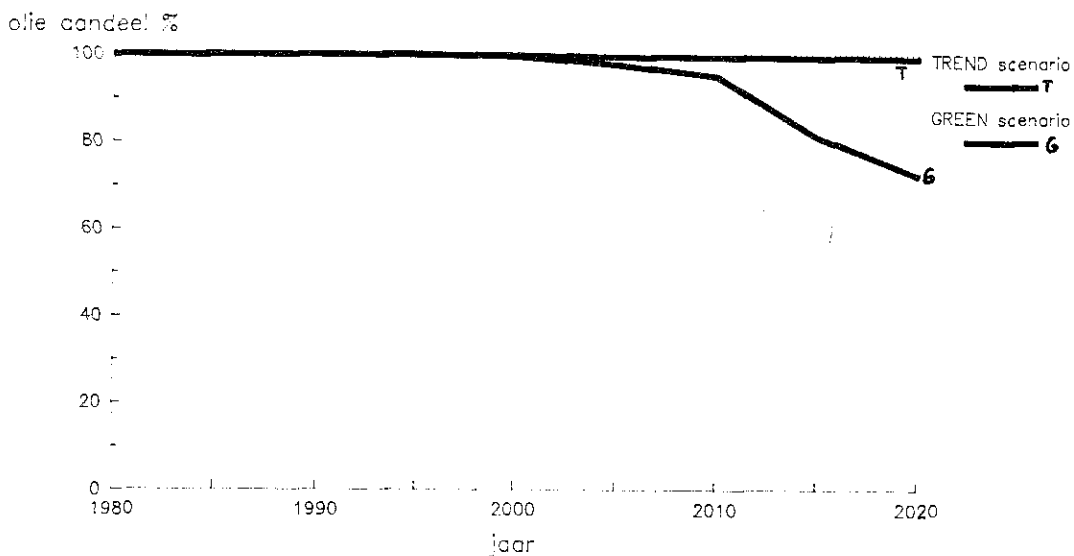


bron: CBS/ESC/NEI/VROM/V&W

Figuur 2.: Gerealiseerde en geprojecteerde ontwikkeling personenauto-kilometers in Nederland

3.1. Basisvariant

Het gebruik van aardolieprodukten (benzine, diesel, LPG) in het wegverkeer blijkt binnen het model van de gehele Nederlandse energiehuishouding een "robuuste" optie (figuur 3). In de basisberekeningen blijft aardolie de belangrijkste brandstof voor het wegverkeer. In het TREND-scenario is het aardoliegebruik nagenoeg volledig. In het GREEN-scenario blijven de personenauto's op benzine/diesel/LPG rijden maar vindt bij bussen en vrachtauto's gedeeltelijke substitutie door CNG en methanol plaats door strengere milieu-eisen in dit scenario. Vermindering van NO_x -emissie bij dieselvrachtauto's en bussen is slechts tegen hoge kosten mogelijk, bij CNG- en methanolmotoren zijn NO_x -bestrijdingstechnieken goedkoper. De introductie van CNG en methanol blijkt uitsluitend een gevolg van de strenge eisen (80% reductie) aan de NO_x -emissie vanuit het wegverkeer in het GREEN-scenario: in een berekening zonder emissie-plafond vindt namelijk géén penetratie van deze alternatieve brandstoffen plaats [1,9].



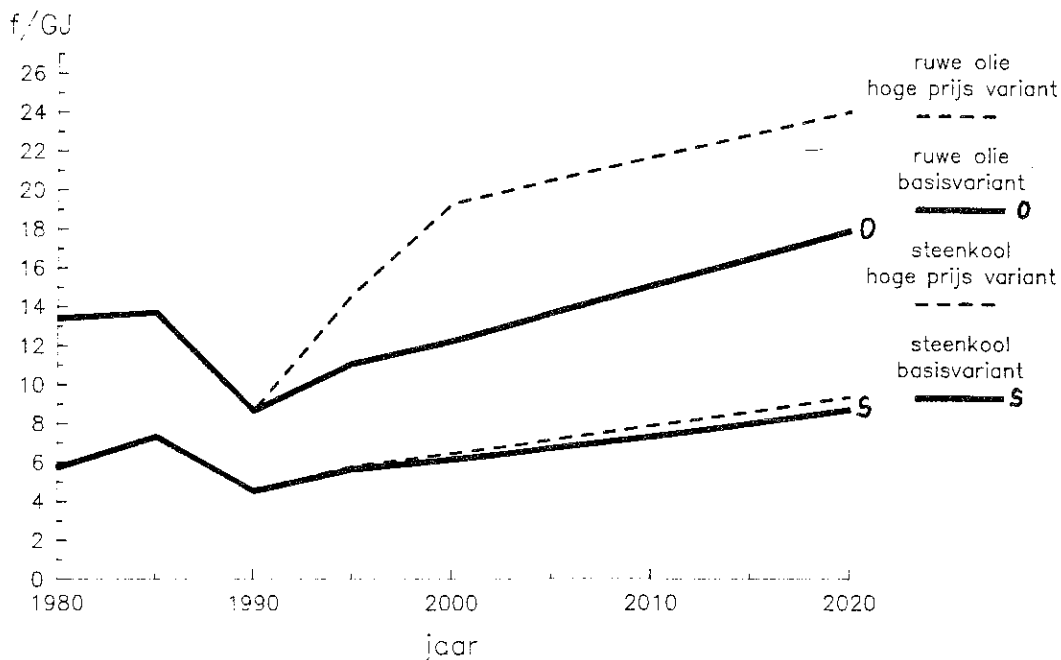
Figuur 3.: Aandeel van aardolie in voorziening energievraag voor wegverkeer [6]

3.2. Variant met hogere energieprijzen

Energieprijzen kunnen sterk fluctueren. De huidige prijs voor ruwe olie (ca. f 8,-/GJ) is laag vergeleken met het prijsniveau aan het begin van de jaren '80. De toekomstige energieprijzen zijn onzeker. In de basisberekening is uitgegaan van een geleidelijke stijging van de energieprijzen. Een plotselinge olieprijs crisis is echter niet uitgesloten. Bij wijze van gevoeligheidsanalyse is daarom voor beide scenario's een hoge prijsvariant doorgerekend.

In de hoge prijsvariant zijn de olie- en gasprijzen vanaf het jaar 2000 50% verhoogd, en blijft de kolenprijs nagenoeg gelijk. (In het GREEN-scenario wijken de energieprijsniveaus nauwelijks af van die van het TREND-scenario).

Het prijsverschil tussen kolen en olie of gas neemt toe in de hoge prijsvariant (figuur 4). Dit bevordert het gebruik van steenkool en andere niet-olie energiebronnen [1]. Voor de transportsector wordt



Figuur 4.: Energieprijs-ontwikkeling: basis-variant en hoge prijsvariant; TREND-scenario [1]



Figuur 5.: Brandstofinzet vrachtauto's: basis-variant en hoge energieprijs-variant; TREND-scenario [6]

daardoor het gebruik van methanol interessant. Methanol kan uit steenkool geproduceerd worden door middel van kolenvergassing. In de berekening met hoge prijsvariant penetreert methanol in eerste instantie als brandstof voor vrachtauto's (zie figuur 5). Daarnaast wordt ook op beperkte schaal brandstof uit biomassa (ethanol) geïntroduceerd.

In de scenarioberekeningen zijn olie- en gasprijzen gekoppeld. Het is evenwel denkbaar dat deze koppeling in de toekomst wordt losgelaten en dat de gasprijsontwikkeling ergens terecht komt tussen de olie- en kolenprijs in. In dat geval zou ook het gebruik van aardgas (CNG) als motorbrandstof aantrekkelijk worden.

3.3. Variant met strenge milieu-eisen (NO_x , CO, VOS)

Emissies van NO_x (stikstofoxiden), CO (koolmonoxide), VOS (vluchtige organische stoffen) en SO_2 (zwaveldioxide) vanuit de Nederlandse energiehuishouding leveren een bijdrage aan fotochemische smog en

zure regen op Europese schaal. In de scenarioberekeningen worden milieu-eisen opgelegd in de vorm van nationale emissieplafonds ("bubble concept") voor NO_x en SO_2 .

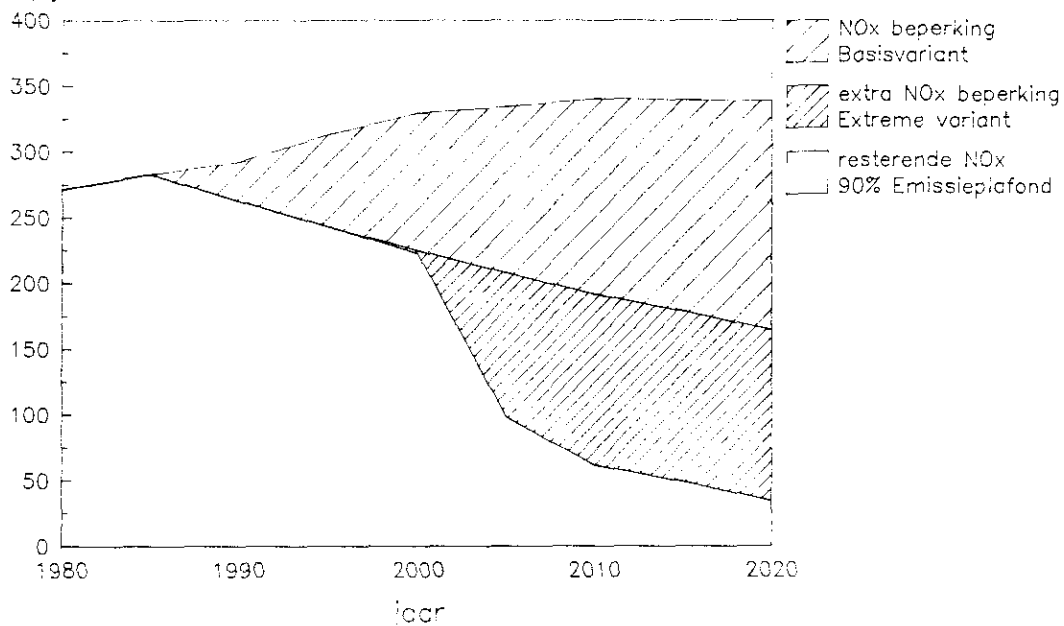
Het wegverkeer is een belangrijke bron van NO_x /CO/VOS-emissies. In tegenstelling tot stationaire bronnen hebben emissiebestrijdingstechnieken in het wegverkeer invloed op zowel NO_x als CO/VOS-emissies. Het nationale NO_x -emissieplafond is daarom gesplitst in twee afzonderlijke plafonds, één voor stationaire bronnen (centrales en dergelijke) en één voor mobiele bronnen (wegverkeer). De NO_x -bestrijdingstechnieken in het wegverkeer zijn zo gekarakteriseerd dat deze in even grote mate NO_x en CO/VOS bestrijden. Voor otto-motoren (benzine, LPG, alcoholen, CNG) zijn lean-burn motoren met oxydatiekatalysator en verschillende typen 3-weg-katalysatoren als emissiebestrijdingstechniek mogelijk. Voor dieselmotoren (diesel, M-33, plantenolie, grote CNG-motoren) zijn uitlaatgasrecirculatie en selectieve katalytische reductie als emissiebestrijdingstechnieken mogelijk.

In de basisberekeningen is het NO_x -emissieplafond in het GREEN-scenario het strengst [1,9]. In dit scenario is sprake van 80% reductie van NO_x /CO/VOS-emissies in het jaar 2020 vergeleken met het niveau van 1985. Deze 80% emissievermindering wordt bereikt door de inzet van steeds betere (en steeds duurdere) emissiebestrijdingstechnieken, ondersteund door een automobiliteits-afname (figuur 1) en een structurele verandering in de energiehuishouding (introductie van methanol, zie § 3.1). De duurste emissiebestrijdingstechniek, die in het GREEN-scenario wordt ingezet, is selectieve katalytische reductie met ureum bij dieselvrachtauto's. Deze techniek, die nog in ontwikkeling is, wordt geïntroduceerd in het jaar 2005, bereikt een aanzienlijke marktpenetratie in 2010 en wordt daarna weer afgebouwd ten gunste van de overgang op methanol.

Door vergelijken van de systeemkosten vóór en na het opleggen van het emissieplafond kunnen de kosten van 80% emissievermindering in het

GREEN-scenario berekend worden als ca. f 4,- à f 5,- per kg NO_x (gulden 1988, niet verdisconteerd, aangenomen dat de ene helft van de kosten aan NO_x en de andere helft aan CO/VOS wordt toegerekend) [6]. Om begrijpelijke redenen (nationale kosten minimaliserend optimalisatiemodel met "perfect foresight", geen technische belemmeringen, structurele veranderingen mogelijk, ondersteuning door mobiliteitsafname) zijn deze NO_x-bestrijdingskosten aanmerkelijk lager dan de door de ministeries van VROM en V&W gehanteerde kostencijfers [9].

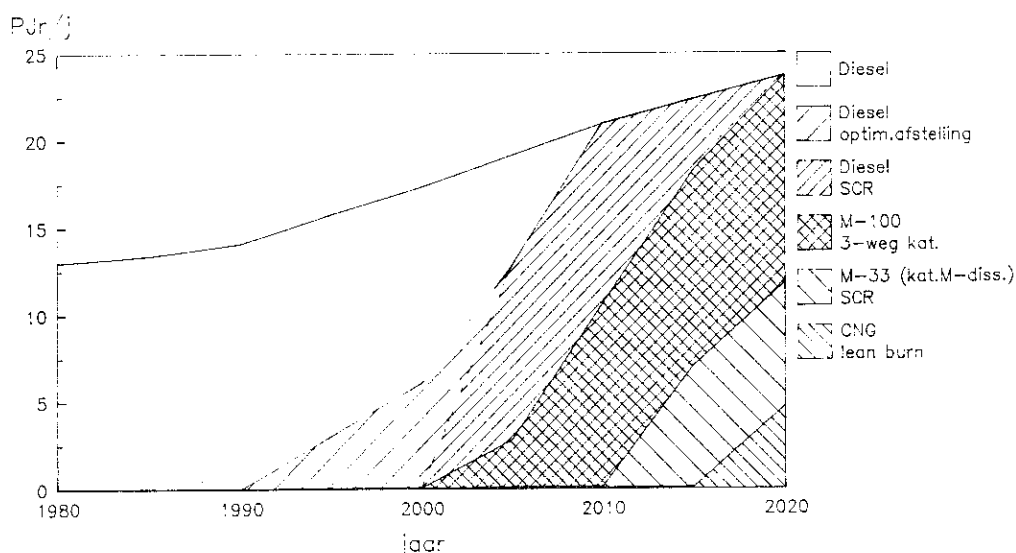
In de basisberekening van het TREND-scenario is sprake van slechts een geringe NO_x-emissievermindering. De algemene verwachting is dat milieubeleid aanzienlijk strenger zal worden op dit punt. Bij wijze van gevoeligheidsanalyse is het TREND-scenario daarom nog een keer doorgerekend met een aanzienlijk lager emissieplafond na het jaar 2000 waardoor de NO_x/CO/VOS emissies met 90% worden gereduceerd in het jaar 2020 (figuur 6). Gegeven de mobiliteitstoename in het TREND-scenario (figuur 1), waardoor de NO_x-emissie in de basisvariant zonder plafond zou toenemen tot 330 kT NO_x/jaar (figuur 5), is zo'n



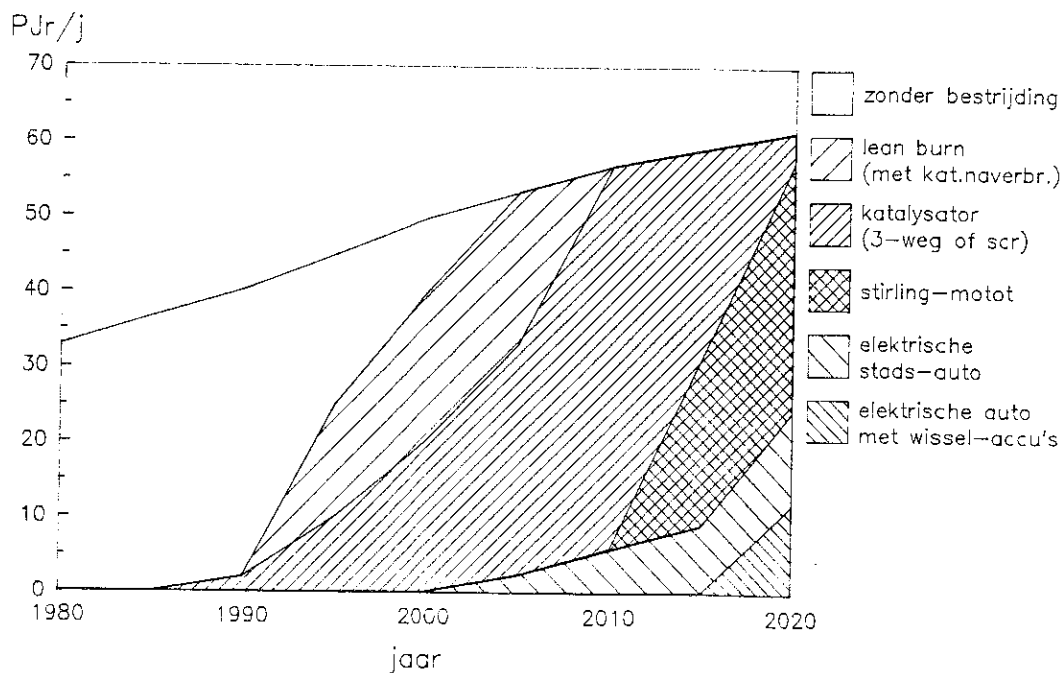
Figuur 6.: Opgelegde NO_x-emissiereductie aan wegverkeer in TREND-scenario in basisvariant en extreme variant [6]

extreme emissievermindering met de thans bekende emissiebestrijdings-technieken (katalysator) niet mogelijk.

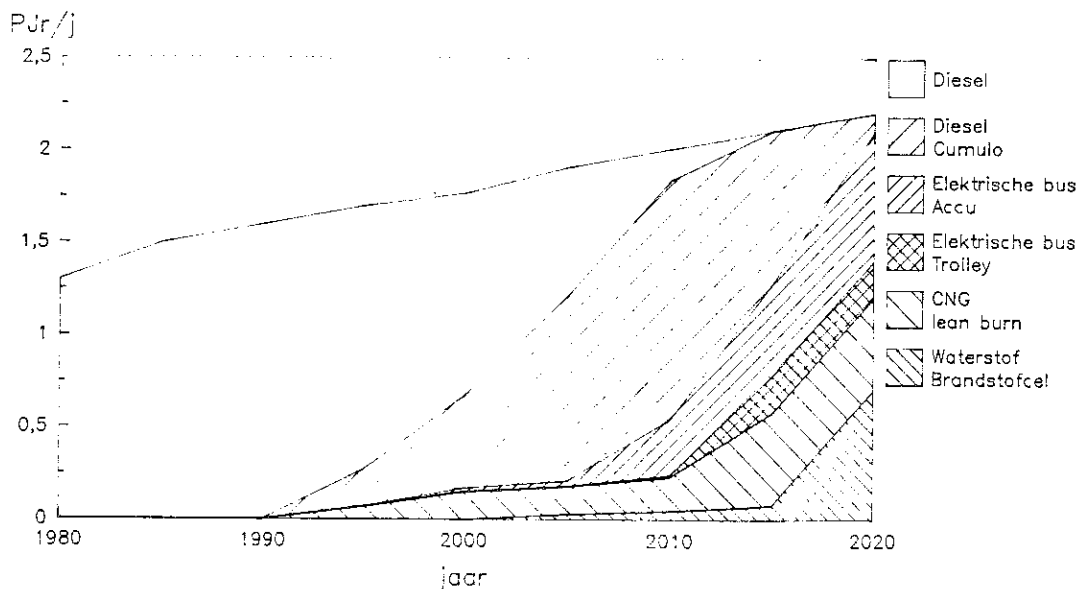
De 90% $\text{NO}_x/\text{CO}/\text{VOS}$ emissievermindering in de extreme variant (gevoeligheidsanalyse) van het TREND-scenario blijkt slechts haalbaar met de inzet van nieuwe exotische energietechnieken. Bij personenauto's worden stirlingmotoren, elektrische stadsauto's en elektrische auto's met wisselaccu geïntroduceerd (figuur 7). Bij vrachtauto's vindt zoals verwacht een overgang van diesel op methanol plaats, daarna worden M-33 en CNG geïntroduceerd (figuur 8). Bij stadsbussen worden remenergie-opslag (vermindert het brandstofgebruik en dus eveneens de emissies), elektrische bussen, CNG en waterstof ingezet (figuur 9). De kosten van deze extra emissievermindering na 2000 zouden f 15,-/kg NO_x bedragen [6]. Inclusief de gerealiseerde emissievermindering in de basisvariant (gearceerde oppervlak in figuur 6) bedragen de kosten van 90% emissievermindering in het TREND-scenario f 8,-/kg NO_x (gulden 1988, niet verdisconteerd, aangenomen dat de ene helft van de kosten aan NO_x en de andere helft aan CO/VOS wordt toegerekend). Gezien het speculatieve karakter van de diverse ingezette exotische energietechnieken moet dit kostencijfer als optimistisch beschouwd worden.



Figuur 7.: Personenauto's, energievraag in TREND-scenario bij extreme (90%) $\text{NO}_x/\text{CO}/\text{VOS}$ -emissiereductie [6]



Figuur 8.: Vrachtauto's, energievraag in TREND-scenario bij extreme (90%) NO_x /CO/VOS-emissiereductie

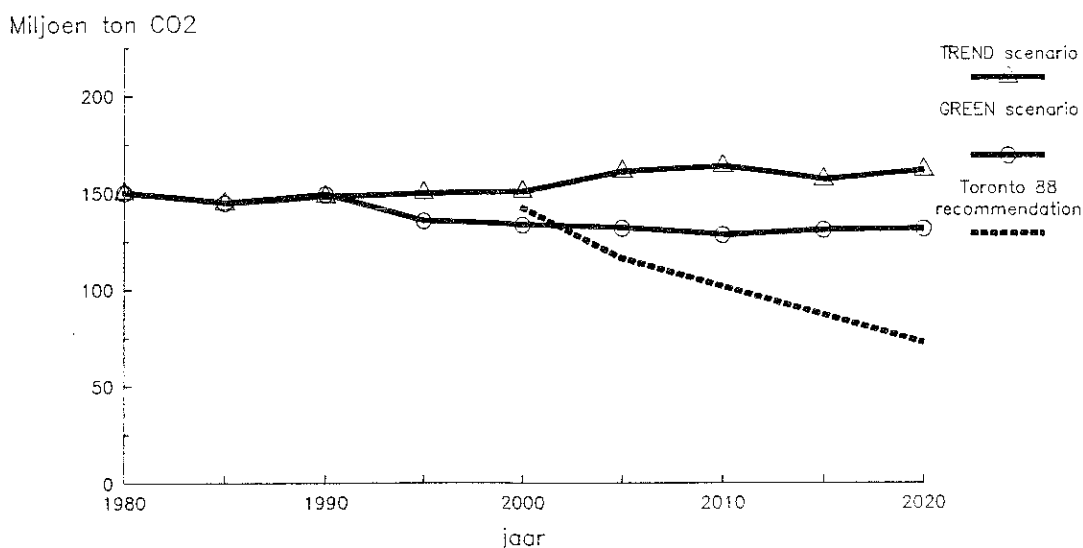


Figuur 9.: Stadsbussen, energievraag in TREND-scenario bij extreme (90%) NO_x /CO/VOS-emissiereductie

3.4. Variant met CO₂-milieu-eis

Emissies van CO₂ (kooldioxide) en andere broeikasgassen vanuit de Nederlandse energiehuishouding leveren een bijdrage aan de opwarming van de aarde: het "broeikas-effect". De verbranding van fossiele brandstoffen (kolen, olie, gas) voor energiedoeleinden is de belangrijkste bron van CO₂. Het broeikas-effect is een mondiaal klimaatprobleem, met voor Nederland mogelijk ernstige gevolgen (stijging van de zeespiegel). Het Nederlandse aandeel in de mondiale CO₂-emissie is thans 0,8%. Er zijn nog geen harde internationale afspraken om gezamenlijk de CO₂-emissie te beperken.

De Nederlandse CO₂-emissie in 1985 was 149 ± 1 MtCO₂ (Mt = Megaton = 10⁹ kg) [11]. In de scenario's zou de CO₂-emissie weinig veranderen. Bij wijze van gevoeligheidsanalyse zijn de scenario's doorgerekend met een CO₂-emissieplafond, dat werd ontleend aan slotverklaringen van recente internationale conferenties over de mondiale klimaatproblematiek [3]. Volgens dit plafond worden de nationale CO₂-emissies ten opzichte van het huidige niveau beperkt met 20% in het jaar 2005, oplopend tot 50% in het jaar 2020, zie figuur 10.



Figuur 10.: Nederlandse CO₂-emissie: TREND- en GREEN-scenario, met mogelijk emissieplafond (50% beperking in 2020) [3]

De cumulatieve CO₂-emissievermindering in deze gevoeligheidsanalyse (50% beperking in 2020) is 1364 MtCO₂ in het TREND-scenario en 725 MtCO₂ in het GREEN-scenario. Uit vergelijking in de systeemkosten vóór en ná het emissieplafond blijkt dat deze CO₂-vermindering f 36,- à f 42,- per ton CO₂ kost (guldens 1988, niet verdisconteerd) [3]. Om deze emissievermindering te bereiken middels een koolstofheffing (carbon-tax) op fossiele brandstoffen zou de prijs voor ruwe olie na het jaar 2000 met ca. 10% verhoogd moeten worden [12]. Het gaat hier om een minimumheffing: een bestemmingsheffing waarbij onder andere wordt aangenomen dat een optimale herverdeling van middelen plaatsvindt volgens de door de modelberekening aangegeven strategie [3]. Het zal immers duidelijk zijn dat van de benzineprijsverhoging als gevolg van zo'n koolstofheffing (4,5 à 7,1 ct per liter [12]) geen effect op de benzinevraag verwacht mag worden.

	g CO ₂ /MJ
Aardgas	56
Ruwe olie	75
Benzine	73 ^{1, 2}
Diesel	73 ²
LPG	66 ²
Motorolie	78 ²
Methanol	70 ³
Ethanol	0 ⁴
Planten-olie	0 ⁴
Waterstof	0

¹ Gemiddelde samenstelling medio 1987. Door de huidige trend naar loodvrije superbenzine met MBTE en methanol kan de emissie dalen naar 72 g CO₂/MJ.

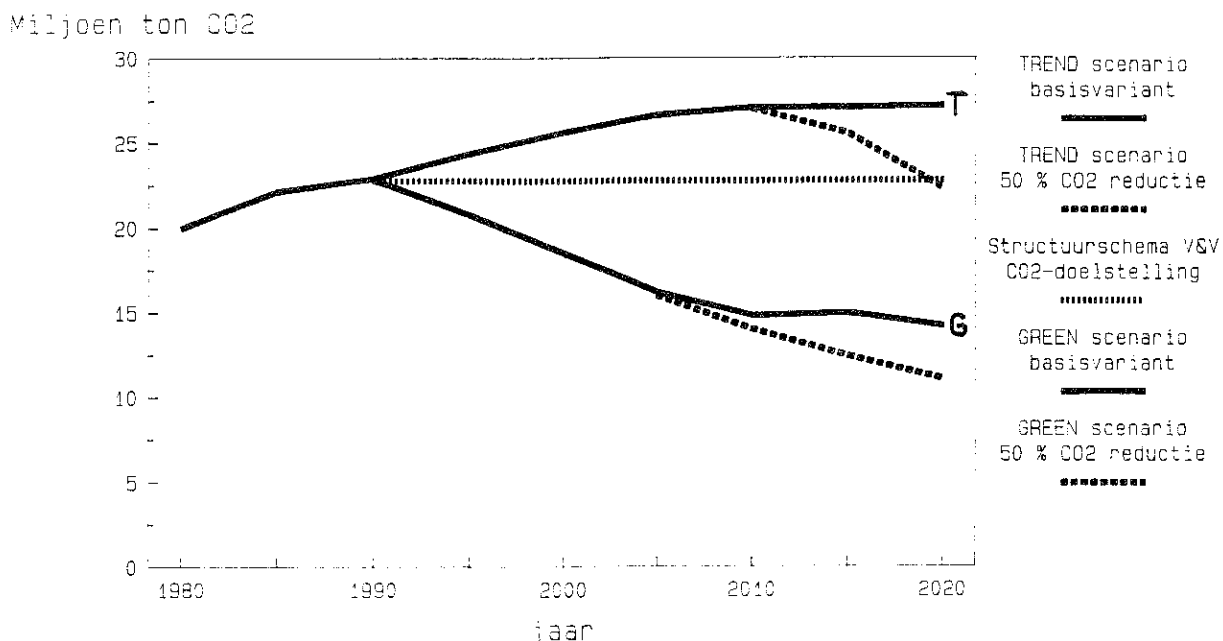
² Exclusief indirecte emissies bij olieraffinage (ca. 5 g CO₂/MJ).

³ Exclusief indirecte emissies bij methanolproductie.

⁴ Aangenomen dat biomassa wordt geproduceerd in een duurzaam landbouwsysteem zonder gebruik van fossiele brandstoffen.

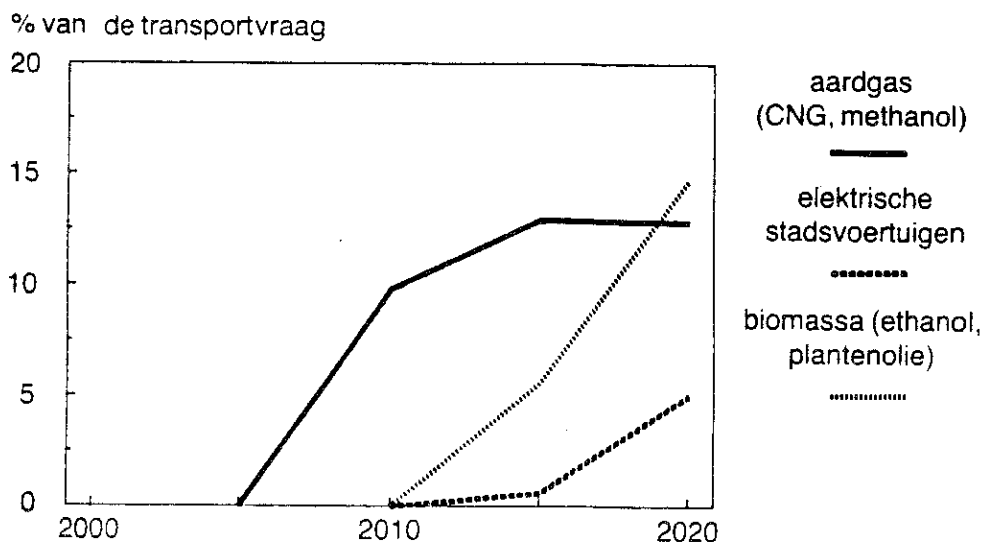
Tabel 2.: CO₂-emissiecoëfficiënten van verschillende motorbrandstoffen g CO₂/MJ onderste verbrandingswaarde [11,14]

De CO₂-emissie van het Nederlandse wegverkeer in 1985 was 21 MtCO₂. Het gaat hier om de directe CO₂-emissies via uitlaatgassen van auto's (tabel 2). Daarnaast zijn er nog "indirecte" CO₂-emissies bij de olieraffinage voor de produktie van motorbrandstoffen en door verbranding van (afgewerkte) motor-olie, deze indirecte CO₂-emissie 1985 was ca. 1,5 MtCO₂ [11]. Het wegverkeer neemt daarmee in totaal 15% van de nationale CO₂-emissie voor zijn rekening. Het verloop van de totale CO₂-emissie vanuit het Nederlandse wegverkeer is weergegeven in figuur 11. In het Nederlandse verkeersbeleid (Structuurschema Verkeer en Vervoer 2010 [13]) is vastgelegd dat de CO₂-emissie door het verkeer, ondanks de groei van het autoverkeer, niet zal toenemen. In het TREND-scenario zou desondanks de emissie toenemen. Deze toename (figuur 11) is overigens geringer dan de toename in de energievraag (figuur 1) omdat een aanzienlijke energetische rendementsverbetering verondersteld is (tabel 1) die nog wordt versterkt door de keuze van lean-burn motoren als belangrijkste optie om aan het betrekkelijk milde NO_x-plafond (figuur 6) te voldoen. In het GREEN-scenario zou de CO₂-emissie afnemen door de veronderstelde afname van de energievraag.



Figuur 11.: CO₂-emissie Nederlands wegverkeer, diverse scenario's

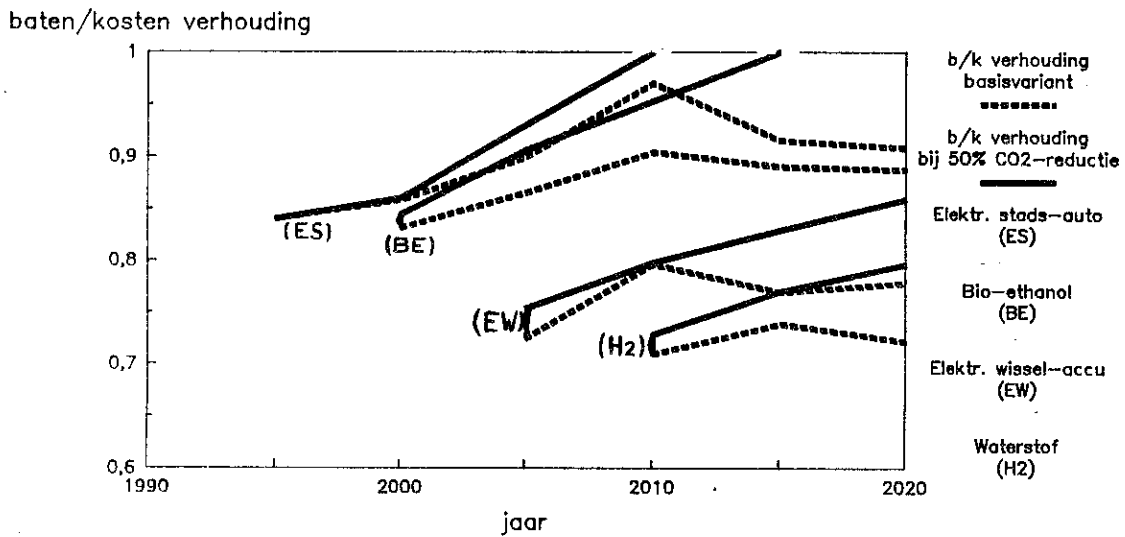
Bij de gevoeligheidsanalyse met 50% CO₂-vermindering in 2020 is voor mobiele bronnen geen apart emissieplafond afgesplitst. In de scenario-berekeningen met het nationale CO₂-emissieplafond vindt de emissievermindering in eerste instantie elders in de energiehuishouding plaats, onder andere door energiebesparing in de woningbouw (isolatie) en door gebruik van hetzij kerncentrales in het TREND-scenario, hetzij gas warmte/kracht-centrales in het GREEN-scenario voor elektriciteitsproductie [3,4]. Daarna treden ook in de sector wegverkeer diverse veranderingen op om de CO₂-emissie te verminderen. In beide scenario's zouden CNG en elektrische stadsbussen en methanol uit aardgas geïntroduceerd worden. In het TREND-scenario worden tevens elektrische stadsauto's gekozen om de CO₂-emissie te verminderen. Overgang op aardgas in plaats van aardolie vermindert de specifieke CO₂-emissie met ca. 25% (vergelijk tabel 2), bij gebruik van elektrische stadsauto's of biomassa treedt geen CO₂-emissie op wanneer de elektriciteit met kernenergie of duurzame bronnen (zon, wind, biogas) is opgewekt of wanneer biomassa in een duurzame landbouwpraktijk zonder input van fossiele brandstoffen is geproduceerd. Bij de modelberekeningen is aangenomen dat elektrische stadsauto's hun accu's vooral 's nachts opladen. Dit is een gunstige combinatie met basislast elektriciteitsopwekking om het nachtdal in de elektriciteitsvraag op te vullen. De introductie van elektrische stadsauto's in het TREND-scenario met 50% CO₂-vermindering vindt gelijktijdig plaats met de bouw van extra kerncentrales. Door de introductie van gas, elektriciteit en biomassa als alternatieve brandstoffen in het wegverkeer bij nationale CO₂-emissievermindering met 50% wordt in deze gevoeligheidsanalyse van het TREND-scenario het streefbeeld van [13]: "geen toename CO₂-emissies" na het jaar 2010 alsnog gehaald (figuur 11). Het aandeel van alternatieve brandstoffen zou daardoor in het TREND-scenario oplopen tot meer dan 30% (figuur 12). In het GREEN-scenario is de verandering in brandstoffen veel kleiner (de CO₂-emissievermindering in figuur 11 in het GREEN-scenario is voornamelijk het gevolg van de verschuiving van kolen naar aardgas als grondstof voor methanolproductie). Dit komt goed overeen met de algemene visie dat het



Figuur 12.: Introductie niet-olie brandstoffen in TREND-scenario bij nationale 50% CO₂-emissievermindering in 2020 [3]

broeikasprobleem vanuit de verkeerssector kan worden aangepakt zowel door indroductie van alternatieve brandstoffen (de strategie in het TREND-scenario) als door vermindering van de automobiliteit en verandering van de modal-split (strategie in het GREEN-scenario) [6].

Dat het landelijke CO₂-emissieplafond meer invloed heeft op de sector wegverkeer in het TREND-scenario is het gevolg van het grotere verkeers-aandeel in de nationale CO₂-emissie en de grotere cumulatieve CO₂-emissievermindering bij opleggen van een nationaal plafond in dit scenario (vergelijk figuur 10 en 11). Het plafond is overigens slechts een gevoeligheidsanalyse. Een interessante vraag is dan ook welke opties van belang zouden worden indien het CO₂-emissie-plafond nog verder aangescherpt zou worden of minder streng zou zijn. Een eerste ruwe indicatie hiervoor is de baten-kosten verhouding. In figuur 13 is ter illustratie voor een aantal personenauto-alternatieven de baten/kosten-verhouding weergegeven, zoals door het model berekend voor het TREND-scenario met en zonder CO₂-plafond.



Figuur 13.: Baten/kosten-verhouding alternatieve brandstoffen voor personenauto's in TREND-scenario mét en zonder 50% nationaal CO₂-plafond [12]

Bij een baten/kosten-verhouding groter dan 1 is een optie nationaal economisch gezien aantrekkelijk. De baten/kostenverhouding = 1 in figuur 13 is dus de "horizon" van marktpenetratie. In de basisberekening van het TREND-scenario (zonder CO₂-plafond) zijn de elektrische, ethanol en waterstof-auto's niet aantrekkelijk; hun baten/kosten-verhouding blijft kleiner dan 1, hoewel de elektrische stadsauto in 2010 wel dicht in de buurt komt. Bij het opleggen van het CO₂-plafond bereiken de elektrische stadsauto en de ethanol-auto baten/kosten = 1 in 2010 respectievelijk 2015. Deze opties penetreren dan in de markt (vergelijk ook figuur 12). De elektrische auto met wissel-accu's en de waterstof-auto zijn nog niet aantrekkelijk genoeg en penetreren ook bij een nationaal 50% CO₂-plafond nog niet. De baten/kosten-verhouding van de elektrische wissel-accu auto ligt wat hoger, de verbetering van baten/kosten door het CO₂-plafond is bij de waterstofauto echter wat groter (figuur 13). Om deze en andere redenen valt moeilijk te beoordelen welke van deze twee opties als eerste aan de beurt zou komen bij een verdere verlaging van het CO₂-plafond.

4. ONDERZOEKSAANBEVELINGEN

Scenariostudies zijn geen toekomstvoorspellingen. De modelstructuur biedt een formeel denkpatroon voor beleidsmakers. Het, voor de in dit rapport beschreven scenariostudies, gebruikte model is geschikt voor onderzoeksbeleid en voor geïntegreerd energie-, milieu- en verkeersbeleid. De uitkomsten van de modelberekeningen zijn een afspiegeling van onze huidige kennis en ideeën omtrent overheidsbeleid en de technologische ontwikkelingen op het gebied van voertuigtechniek en alternatieve brandstoffen. In tabel 3 wordt de bijdrage van alternatieve brandstoffen in de verschillende scenario-varianten kwalitatief samengevat. Voortgezet onderzoek aan alternatieve brandstoffen is een soort verzekeringspremie tegen mogelijk optredende problemen op het gebied van olievoorziening en milieu.

Probleem	Geen	Olievoor- ziening	Zure regen, Smog	Broeikas- effect
Variant	Basis- variant	50% hogere olieprijs	90% NO _x vermindering	50% CO ₂ vermindering
Methanol	+	++	+	+
Elektrische auto's	0	0	++	++
Aardgas (CNG)	+	+	0	+
Brandstof uit biomassa	0	+	0	++
Stirling motor	0	0	0	0
Waterstof brandstofcel	0	0	++	0

0 = geen bijdrage

+ = beperkte bijdrage

++ = aanzienlijke bijdrage

Tabel 3.: Bijdrage van alternatieve brandstoffen bij verschillende problemen (scenario-varianten Nederland, periode 1989-2020)
[6]

REFERENTIES

- [1] Boswinkel, H.H.; D. Gerbers; T. Kram; P. Lako; P.A. Okken; D.N. Tiemersma
Kansen voor nieuwe energietechnieken in Nederland - Globale resultaten van de EOS-studie
ESC-WR-88-22, ESC/ECN, Petten, november 1987
- [2] Boswinkel, H.H.; P.A. Okken
Impacts of environmental and price constraints on future heat-pump applications in the Netherlands
In: Research activities on advanced heatpumps
(ed. F. Moser) pp. 477-486
TU Graz, Austria, 1988
- [3] Kram, T.; P.A. Okken
Twee laag-CO₂ energiescenario's
Energiespectrum 13 (1989) pp. 66-76
- [4] Kram, T.; P.A. Okken
Two low-CO₂ energy scenarios for the Netherlands
In: Energy technologies for reducing emissions of greenhouse gases, pp. 465-486, IEA/OECD, Parijs, France, 1989
- [5] Kroon, P.; H. Cornelisse
Energiebesparing bij het verkeer & vervoer 1973-1987; een evaluatie van overheidsmaatregelen
ESC-51, Petten, november 1989
- [6] Kram, T.; P.A. Okken
Impacts of environmental and oil price constraints on alternative automotive fuels and vehicles; a long term research appraisal
CEC Int. Symp. of performance evaluation for automotive fuels and lubricants
CEC, Paris/London, April 1989
- [7] Okken, P.A.
Technische uitgangspunten en achtergronden NOVEM-scenariostudie "Kansen voor alternatieve brandstoffen in het wegverkeer"
ESC-WR-88-25, Petten, oktober 1988
- [8] Bakema, G.F.
Economische en milieu-aspecten van introductie van elektrische auto's
ESC-50, Petten, oktober 1989
- [9] Okken, P.A.
Optimalisatie van het milieubeleid
Gas 108 (1988), pp. 492-299

- [10] Oostvoorn, F. van; P. Kroon; A.V.M. de Lange
SERUM: een model van de Nederlandse raffinage industrie
ESC-49, Petten, oktober 1989

- [11] Okken, P.A.; D.N. Tiemersma
Geenhouse gas emissions from the energy system; two methods to
calculate national CO₂-emissions
ESC-WR-89-16, Petten, oktober 1989

- [12] Kram, T.; P.A. Okken
Integrated assessment of energy-options for CO₂-reduction
In: Climate and Energy (ed. P.A. Okken, R.J. Swart, S. Zwerver)
pp. 243-260. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht 1989

- [13] Tweede structuurschema Verkeer en Vervoer
Ministeries van V&W en VROM
Den Haag, 30 november 1988

- [14] Blok, K.; S. Fockens; J. Bijlsma; P.A. Okken
CO₂-emissiecoëfficiënten voor brandstoffen in Nederland
RU-Utrecht, ECN, ESC-WR-88-12, Petten mei 1988

BIJLAGE

TECHNISCHE UITGANGSPUNTEN EN ACHTERGRONDEN NOVEM-SCENARIOSTUDIE
"KANSEN VOOR ALTERNATIEVE BRANDSTOFFEN IN HET WEGVERKEER"

P.A. Okken

Oktober 1988

<u>INHOUDSOPGAVE BIJLAGE</u>	<u>Blz.</u>
1. INLEIDING	35
2. MOBILITEITSONTWIKKELING	36
3. VOERTUIGEN	41
3.1. Personenauto's	42
3.1.1. Benzine, diesel, LPG	44
3.1.2. CNG	44
3.1.3. M-100	46
3.1.4. E-100	47
3.1.5. Elektrische auto's	47
3.1.6. Elektrische stadsauto	50
3.1.7. Elektrische auto met wisselaccu's	55
3.1.8. Stirlingmotor-hybride	57
3.2. Stads- en streekbussen	58
3.2.1. Dieselbus	60
3.2.2. Dieselbus met rem-energie-opslag	60
3.2.3. Elektrische trolleybus	61
3.2.4. Elektrische accubus	64
3.2.5. Brandstofcelbus met vliegwiel	64
3.2.6. CNG-bus	64
3.3. Vrachtauto's	65
3.3.1. Dieselvrachtauto	65
3.3.2. M-100	66
3.3.3. M-33/D-67	67
3.3.4. CNG	69
3.3.5. "E-100", brandstof uit biomassa	69
4. BRANDSTOFFEN, MILIEU	72
4.1. Brandstoffen	72
4.2. Milieu-eisen	75
REFERENTIES	77

LIJST VAN TABELLEN EN FIGUREN

<u>Tabellen</u>	<u>Blz.</u>
A.1. Energievraag-ontwikkeling transportsector, TREND-scenario	40
A.2. Energievraag-ontwikkeling transportsector, GREEN-scenario	40
A.3. Uitgangsgegevens personenauto's	43
A.4. Energetisch rendement personenauto's, verloop in de tijd	43
A.5. Uitgangsgegevens stads- en streekbussen	59
A.6. Energetisch rendement stads- en streekbussen, verloop in de tijd	59
A.7. Uitgangsgegevens vrachtauto's	65
A.8. Energetisch rendement vrachtauto's, verloop in de tijd	65
A.9. Prijs en beschikbaarheid ethanol	74

<u>Figuren</u>	
A.1 Nuttige energievraag personenauto's; diverse scenario's	39
A.2 Nuttige energievraag vrachtauto's; diverse scenario's	39
A.3. Primair energiegebruik door elektrische en door conventionele voertuigen, uitgaande van ruwe olie	48
A.4. Massa- en volume-specifieke energieopslagdichtheden van alternatieve secundaire energiedragers	49
A.5. Actieradius als functie van het relatieve accugewicht	49
A.6. Specific energy against specific power for various energy conversion and storage systems	50
A.7. Methanol-dissociatie	68
A.8 Prijsontwikkeling brandstoffen	72
A.9 Emissieplafonds NO _x -transportsector	75

1. INLEIDING

In deze bijlage worden de technische gegevens gepresenteerd van voertuigen, mobiliteitsontwikkeling, energieprijzen en milieu-eisen die als invoerparameter dienen voor het bij de scenariostudies gebruikte IEA-MARKAL-model van de Nederlandse energiehuishouding.

Mobiliteitsontwikkeling

Mobiliteit wordt voor het model vertaald naar nuttig energiegebruik in drie verschillende marktsectoren. Er worden twee verschillende mobiliteitsscenario's gebruikt.

Voertuigen

Als invoerparameter zijn van belang: investeringskosten, onderhoudskosten, brandstofsoort, afleveringskosten voor brandstof, energetisch omzettingsrendement, startjaar en maximaal marktaandeel, alsmede emissie-coëfficiënten en -bestrijdingstechnieken. Er worden 20 voertuigtypes onderscheiden, met 9 verschillende brandstoffen (benzine, diesel, LPG, CNG, elektriciteit, methanol, ethanol, plantenolie, waterstof) in 3 marktsectoren (personenauto's, vrachtauto's, stadsbussen).

Overige gegevens

Gegevens voor kosten en rendementen van olieraffinage, elektriciteitsopwekking, emissiebestrijdingstechnieken, etc. zijn te vinden in referenties [1,2,3]. Daarnaast zijn als invoerparameters van belang de importprijzen van ruwe olie en andere energiedragers en nationale emissieplafonds voor luchtverontreinigende stoffen. Het MARKAL-model zoekt met al deze gegevens een nationaal-economisch optimum voor de gehele Nederlandse energiehuishouding.

2. MOBILITEITSONTWIKKELING

In het model worden drie sectoren van wegverkeer onderscheiden:

- Personenauto's;
- Vrachtauto's lange afstand;
- Stads- en streekbussen.

Daarnaast zijn als energiegebruikende transportsectoren nog aanwezig:

- Mobiele apparaten (kranen, tractoren);
- Binnenschepen;
- Spoorwegen;
- Internationale bunkers (vliegtuigen, kustvaart, zeevaart).

De mobiliteitsontwikkeling wordt voor het model vertaald in nuttige energievraag (energie "op de weg" (PJ-road)) in iedere sector. Er worden twee sterk verschillende scenario's voor mobiliteitsontwikkeling gebruikt. De scenario's sluiten aan bij de EOS-scenario's [1], diverse "officiële" prognoses van de ministeries van VROM en V&W [4,5] en het "Schoon op weg" scenario van de Vereniging Milieu-defensie [6,7].

EOS-scenario's

In de EOS-studie [1] zijn drie scenario's voor de periode 1980-2020 gebruikt:

- Dynamiek en Groei (DG);
- Blokvorming en Sturing (BS);
- Gedeelde Ontwikkeling (GO).

Deze scenario's vormen een afspiegeling van mogelijke wereldwijde ontwikkelingen [8]. De nuttige energievraag in de transportsector verschilt in de drie scenario's [1]. In het DG-scenario waar de nadruk ligt op vrijhandel en dynamiek is de mobiliteit het grootst, in het GO-scenario waar de nadruk ligt op milieuzorg en duurzaamheid is de mobiliteit het kleinst. De emissieplafonds voor NO_x (stikstofoxy-

den) verschillen eveneens, deze liggen in het DG-scenario het hoogst en in GO het laagst [1].

Prognoses VROM en V&W

De ministeries [4] hebben prognoses gemaakt van toekomstige verkeersprestaties in 2000 en 2010 met behulp van een NEI-model en gebaseerd op economische groeiscenario's van het CPB. Daarbij zijn ook pakketten autoverkeersgroeiremmende maatregelen bekeken [4]. Daarnaast zijn door de ministeries diverse andere prognoses gemaakt, bijvoorbeeld voor 2010 door het Ministerie van V&W in [5].

Schoon op weg

De Vereniging Milieudefensie en de TU Delft hebben een scenario gemaakt voor de periode 1984-2010 waarin het autoverkeer sterk wordt teruggedrongen ten voordele van openbaar vervoer. Uitgangspunt van dit scenario vormde een set milieu- en risico-doelstellingen zoals vermindering van NO_x - en CO/VOS-emissie, CO_2 -emissie, geluidshinder, verstoring en aantal verkeersdoden. Niet al deze doelstellingen worden overigens gehaald [6,7].

Dit zgn. "trendbreuk-scenario" wordt afgezet tegen een trend-scenario wat een afspiegeling vormt van het huidige overheidsbeleid.

Vergelijking scenario's

Uit een onderlinge vergelijking van de verschillende scenario's (uitgedrukt in nuttige energievraag in de drie sectoren) komt een grote spreiding naar voren. Vooral het trendbreuk-scenario wijkt af van de andere scenario's; het EOS-GO-scenario komt nog het meest in de buurt. Bij de hoge scenario's valt vooral het "ongewijzigd beleid"-scenario van het Ministerie van V&W uit de toon.

Scenario-keuze

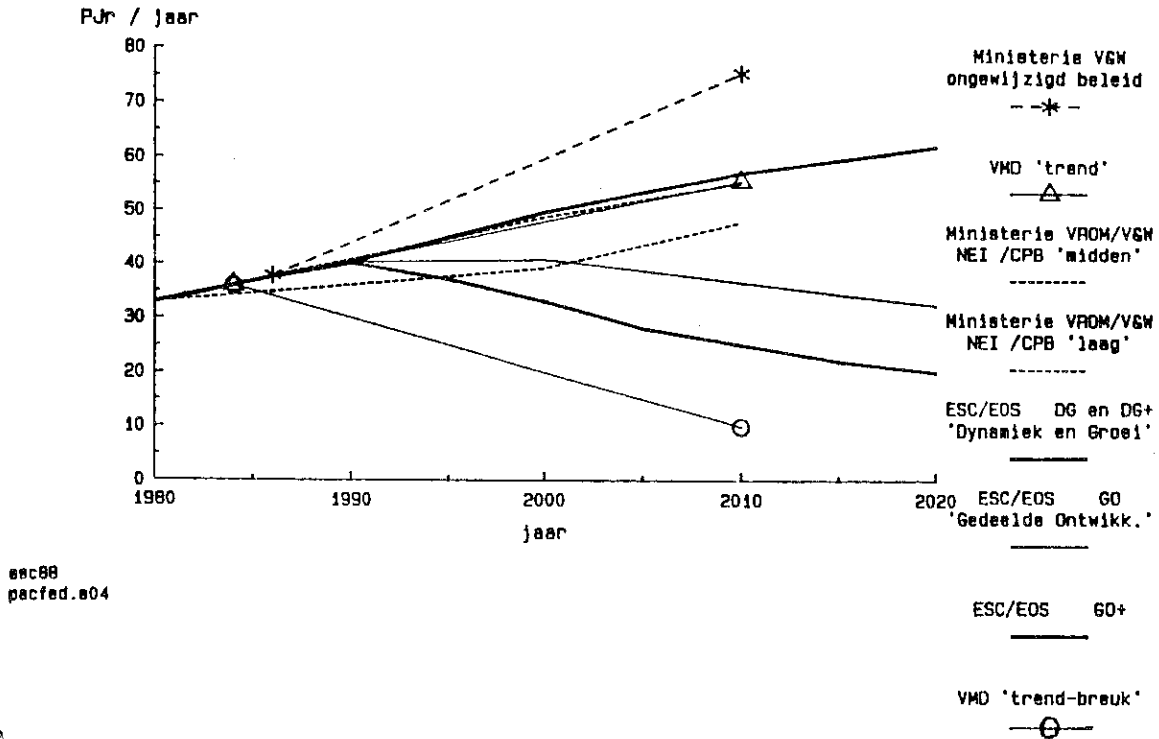
Voorlopig wordt uitgegaan van de EOS-DG en GO-scenario's, als de twee energievraagscenario's voor deze studie.

Eén van de scenario's is sterk op milieudoelstellingen gericht. Dit scenario wordt aangeduid als GREEN/GO+. Om aan milieu-eisen voor NO_x -, CO/VOS- of CO_2 -emissies te voldoen is in het model een verfijnder instrumentarium beschikbaar, met mogelijkheden voor nieuwe emissiebestrijdingstechnieken en brandstofsubstitutie, zodat de vergaande vermindering van personenauto's zoals in het trendbreuk-scenario niet per sé nodig is om emissiedoelstellingen te bereiken. De personenauto energievraag in dit GREEN-scenario ligt daarom tussen enerzijds V&W-laag [4] en GO [1], en anderzijds het trendbreuk-scenario [6,7], zie figuur A.1. Ook de energievraag van bussen en treinen ligt dan tussen deze scenario's in.

Voor wat betreft vrachtvervoer is het GO-scenario aangehouden; wat opnieuw goed overeenkomt met het V&W-laag-scenario, figuur A.2.

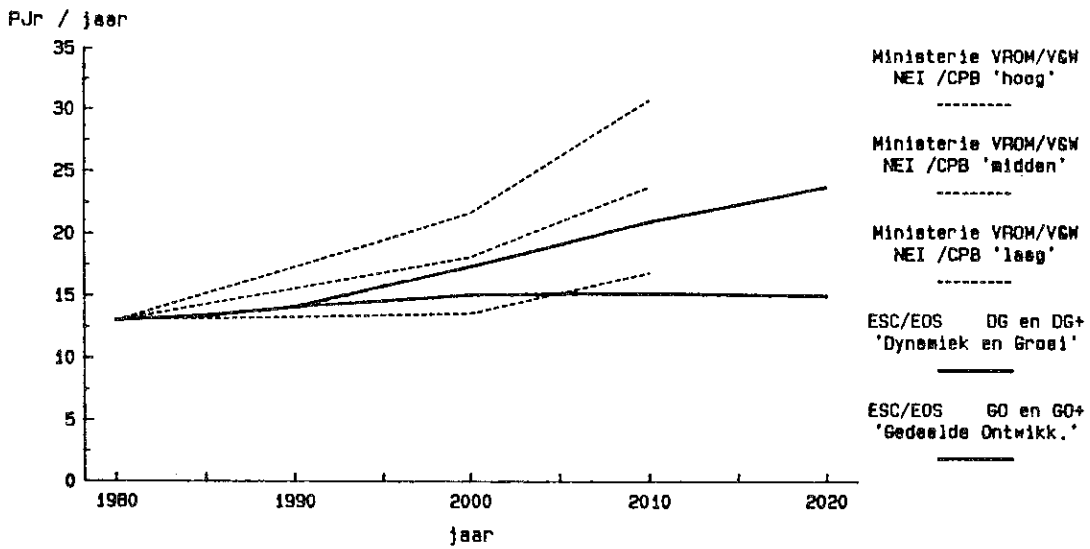
Het andere scenario is minder op milieudoelstellingen gericht. Dit scenario wordt aangeduid als TREND/DG+. De personenauto energievraag in dit scenario ligt op het niveau van V&W-midden [4], DG [1] en het TREND-scenario [6,7]. Dit scenario is een afspiegeling van het verkeersbeleid zoals dat momenteel gevoerd wordt. Bij de personentrein energievraag is realisatie van het NS-plan rail-21 [10] in het scenario opgenomen. Voor wat betreft vrachtvervoer is het DG-scenario aangehouden; wat opnieuw goed overeenkomt met het V&W-middenscenario (zie figuur A.1 en A.2).

In tabel A.1 en A.2 wordt de energievraagontwikkeling in de twee scenario's TREND en GREEN voor de transportsector samengevat. De energievraag voor binnenschepen en mobile equipment, alsmede de bunkering voor kustvaart, zeevaart en vliegtuigen is niet weergegeven; Deze is niet gewijzigd t.o.v. de oorspronkelijke DG- en GO-scenario's.



esc88
pacfed.e04

Figuur A.1.: Nuttige energievraag personenauto's; diverse scenario's



Figuur A.2.: Nuttige energievraag vrachtauto's; diverse scenario's

	Passenger Cars	Local Bus	Long Distance Truck	Diesel Rail	Electr. Rail
1980	32,9	1,3	13,0	0,45	2,73
1985	36,7	1,5	13,4	0,39	3,12
1990	40,3	1,6	14,1	0,34	3,23
1995	45,0	1,7	15,8	0,3	3,34
2000	49,7	1,8	17,4	0,25	3,45
2005	53,4	1,9	19,2	0,23	4,0
2010	57,1	2,0	21,0	0,2	4,55
2015	59,5	2,1	22,4	0,17	5,15
2020	62,0	2,2	23,8	0,15	5,75

Tabel A.1.: Energievraag-ontwikkeling (PJr/jaar) transportsector, TREND-scenario

	Passenger ¹ Cars	Local ¹ Bus	Long Distance Truck	Diesel Rail	Electr. ¹ Rail
1980	32,9	1,3	13,0	0,45	2,73
1985	36,7	1,5	13,4	0,39	3,12
1990	40	1,6	14,1	0,35	3,23
1995	37	2,0	14,6	0,35	3,6
2000	33	2,5	15,1	0,35	4
2005	28	3,4	15,2	0,35	5
2010	25	4,1	15,2	0,35	6
2015	22	4,5	15,1	0,35	7
2020	20	5,0	15,0	0,35	7,5

¹ Gewijzigd t.o.v. GO

Tabel A.2.: Energievraag-ontwikkeling (PJr/jaar) transportsector, GREEN-scenario

3. VOERTUIGEN

De scenariostudies zijn bedoeld om kansen voor alternatieve brandstoffen en veranderingen in de energiehuishouding aan te geven, onder verschillende externe omstandigheden. Daartoe wordt een dynamisch model van de energiehuishouding gebruikt, waarbij exogene milieu-eisen, mobiliteit en energieprijzen worden toegevoegd. Binnen het model krijgen alle alternatieven de kans (vrije concurrentie) om gezamenlijk aan de exogene eisen te voldoen. Ingegaan wordt op de kenmerken en verwachtingen voor "voertuigen".

Voertuigen vormen een mobiele energietechniek. Vergeleken met de stationaire andere energietechnieken (zoals gasketels, elektriciteitscentrales, raffinaderijen) in het model, hebben voertuigen de volgende kenmerken:

- a. Relatief korte levensduur (10 à 15 jaar).
- b. Investerings- en onderhoudskosten zijn veel hoger dan de kosten voor brandstof, althans bij personenauto's (in een macro-economische optimalisatie wordt geen rekening gehouden met accijnzen).
- c. De kosten van emissiebestrijding (NO_x en CO/VOS) zijn relatief hoog; de emissie-coëfficiënten lopen sterk uiteen.
- d. In principe is een breed scala van brandstoffen mogelijk, zoals methanol uit steenkool, benzine, aardgas (CNG), ethanol uit graan of elektriciteit.

Dit leidt tot de volgende verwachtingen bij de macro-economische optimalisatie.

Ad a.

Veranderingen in de transportsector kunnen zich betrekkelijk snel voltrekken, de sector is flexibel. Of dit in de praktijk ook optreedt is nog maar de vraag; het model berekent slechts wat macro-economisch optimaal zou zijn.

Ad b.

Procentueel gezien kleine verschillen in investerings- of onderhoudskosten kunnen belangrijker zijn dan verschillen in brandstof of energetisch rendement.

Ad c.

Emissieplafonds voor NO_x en CO/VOS kunnen brandstofsubstitutie bewerkstelligen.

Ad d.

Vershillen in importprijzen voor primaire energie (olie, kolen, gas, ethanol), en ontwikkelingen elders in de energiehuishouding (elektriciteitssector, kolenvergassing), kunnen op den duur de brandstofkeuze beïnvloeden. Van een eventueel CO_2 -emissieplafond wordt een belangrijke invloed op de brandstofkeuze verwacht omdat in de transportsector de specifieke CO_2 -emissies het meest uiteenlopen.

3.1. Personenauto's

In tabel A.3 en A.4 worden uitgangspunten voor de personenauto's gegeven. De jaarlijkse nuttige energievraag is thans ca. 7,2 GJr per auto (GJr = GJ"road" = energie aan de wielen). Een investering van f 2.090,-/GJr/jaar voor een benzine-auto komt dus overeen met f 15.000,- (bruto prijzen, medio 1985, zonder belasting). De absolute hoogte van de prijs is voor de modelberekeningen van minder belang dan de prijsverschillen tussen voertuigtypes. De levensduur is 10 jaar. Bestelauto's zijn als personenauto's geteld.

Brandstof	Investering f/GJr/y	Onderhoud f/GJr	Aflevering brandstof f/GJ	Start	Max.aandeel
Benzine	2090	135	6,2		
Diesel	2470	128,3	5,7		
LPG	2280	142,6	5,8		
CNG-97/El.3	2520	205->190	8 ¹	1990	10->80%
M-100	2200 ¹	140 ¹	8 ¹	1995	90%
E-100	2200 ¹	140 ¹	7 ¹	1995	<80%
Waterstof	2760	147,3	6	2005	90%
Elektrisch, ¹ stad	3065->2925	170->145	4	1995	5->20%
Elektrisch, ¹ wissel-accu	3340->3135	175->150	40->20	2000	20->80%
Stirling- ¹ hybride	3025->2750	157->143	5,8	2000	

¹ Gewijzigd t.o.v. [2,11]

Tabel A.3.: Uitgangsgegevens personenauto's

Toelichting:

Investering en onderhoud per GJr (= road) nuttige energie op de weg.
Afleveringskosten per GJ primaire energie in brandstof.

Brandstof	1980	1985	1990	2000	2010	2020
Benzine	16,0	16,6	17,5	19,4	21,5	23,8
Diesel	17,8	18,6	19,5	21,5	23,3	25,2
LPG	16,2	16,8	17,6	19,3	21,4	23,6
M-100 of E-100			17,6	19,4	21,4	23,6
CNG-97/El.3			18,2	20,1	22,0	23,9
Waterstof				18,6	20,7	22,9
El.city car ¹				40		55
El.batt.mod ¹				40		50
Stirling-hybride ¹				21,3	24,0	26,7

¹ Gewijzigd t.o.v. [2,11]

Tabel A.4.: Energetisch rendement personenauto's (%), verloop in de tijd

Toelichting:

Voertuigrendement, dus inclusief acculaad-, deellast- en transmissieverliezen; van GJ finale energie (brandstof of elektriciteit) naar GJ nuttige energie. Dus exclusief rendement elektriciteitscentrale.

Verondersteld is dat bij alle typen personenauto's continu verbeteringen van de efficiency plaatsvinden; zowel door verbeteringen van het motorrendement als door verbetering van de overbrenging. Voor de periode 1990-2000 kan het gaan om: dieselmotoren met directe injectie, 1e generatie keramische dieselmotoren, continu variabele transmissie, kunststof carosseriedelen, vliegwiel voor starten/stoppen van de motor, een cw-waarde van 0,25 [39,40]. Voor de periode na 2000: vaste smeermiddelen, geavanceerde keramische dieselmotor, zuurstofscheiding, composiet chassis, magnesium motor en wielen, zonnecellen voor accessoires, remenergie-opslag, een cw-waarde van 0,20 ([39] Vergelijk ook [52]).

3.1.1. Benzine, diesel, LPG

De uitgangspunten zijn niet gewijzigd ten opzichte van de EOS-berekeningen medio 1987 [2,11].

3.1.2. CNG

Een benzine-auto kan net als op LPG ook worden afgesteld op CNG (Compressed Natural Gas = gecomprimeerd aardgas). CNG-auto's rijden (enige honderduizenden stuks) in o.a. Italië en Nieuw-Zeeland [41, 42]. Elders wordt getracht CNG als transportbrandstof te introduceren, vaak op plaatsen (bijv. Nieuw-Zeeland, Texas, Tasjkent [41,43, 45] waar veel gas beschikbaar is maar geen andere lokale gasmarkt aanwezig is. Ook in Nederland zijn CNG-proefprojecten uitgevoerd.

Bij ombouw van benzine naar CNG treden o.a. de volgende veranderingen op: onvermijdelijk vermogensverlies van ca. 10 à 20%, extra voertuig-gewicht 120 kg. De ombouwkosten zijn in Nederland thans ca. f 3.500,- [12], in Nieuw-Zeeland waren de ombouwkosten in 1984 gemiddeld (40.000 voertuigen) ca. f 2.965,- [41]. In de VS zijn de ombouwkosten f 3.000,- à f 4.000,- [43].

Aangenomen wordt dat de ombouwkosten bij serieproductie kunnen dalen tot ca. f 2.500,- per auto, wat meer in de buurt komt van de LPG-auto. Daarnaast zijn echter nog extra investeringen nodig voor een grotere auto en grotere motor; gerekend wordt met f 600,- meer-investering per auto. De onderhoudskosten zullen ongeveer gelijk zijn aan die voor een LPG-auto; enerzijds lager vergeleken met benzine door de geringere slijtage; anderzijds hoger vanwege veiligheidscontroles.

De afleveringskosten van CNG kunnen lager zijn dan bij olieprodukten omdat de brandstof niet per tankauto maar per pijpleiding (landelijk gasnet) wordt aangevoerd. Bij olieprodukten wordt gerekend met tankautotransportkosten f 5,- + 0,25 x km per ton; bij een gemiddelde transportafstand van 150 km komt dit neer op ca. f 2,-/GJ.

CNG kan betrekkelijk snel (2 à 10 minuten) getankt worden uit een cascade van hoge druk gascilinders; of langzaam (een nacht) met een grote gemeenschappelijke of kleine huishoudelijke gascompressor. Thuis zelf CNG tanken zal vermoedelijk vanwege de risico's niet worden toegestaan. Het explosiegevaar in garages is groter (er kan een explosief mengsel ontstaan bij lekkage) maar bij weggelukkig vermoedelijk kleiner dan bij benzine-auto's. Bij 3 minuten extra tanken voor 20 m³ gas en een uurloon van f 60,- komen de delivery costs f 4,-/GJ hoger uit.

De kosten voor gascompressorstations zijn bij de O+M-costs verrekend. Volgens [12] zijn de investeringskosten voor de compressorinstallatie f 1.500,- à f 2.000,- per CNG-auto. Bij een levensduur van 20 jaar een jaarlijks onderhoudpercentage van 4% en 25% toeslag voor bouwkundige voorzieningen komen de kosten voor het gascompressorstation op f 45,- à f 60,- per GJr.

Het energetisch rendement van de motor kan hoger zijn dan bij benzine (hoger octaangetal); aan de andere kant neemt het voertuiggewicht toe (grotere motor, grotere auto, 120 kg extra voor CNG-tanks) waardoor

het rendement aan de wielen weer lager wordt. Bovendien is extra energie nodig voor de compressie tot 200 bar; dit is ca. 3% van de energie-inhoud van het gas bij gebruik van een elektrische compressor gekoppeld aan een lage druk gasleiding (0,3 kWh/m³ gas) [13,43]. Wanneer uit veiligheidsoverwegingen alleen CNG getankt zal kunnen worden bij speciale tankstations buiten de bebouwde kom; dan komt de compressie-energie wellicht iets lager uit bij gebruik van het 40 of 67 bar gasnet [12], gerekend wordt met 3 GJ elektriciteit per 100 GJ CNG. Al met al zal het energetisch rendement van de CNG-auto nauwelijks hoger zijn dan van een benzine-auto.

Gezien de institutionele verhoudingen en de te verwachten traagheid bij de opbouw van een landelijk net van CNG-hoge druk gastankstations is de maximale penetratie in eerste instantie gering. Vooral de sector bestelwagens (o.a. het bedrijfswagenpark van de nutsbedrijven) lijkt in eerste instantie interessant, deze sector neemt thans ca. 7% van de personenauto-transportprestatie voor zijn rekening [32]. De penetratie zou na de start in 1990 tot 2000 maximaal 10% kunnen zijn, daarna zouden de belemmeringen kunnen verdwijnen en de maximale penetratie tot 80% kunnen oplopen.

3.1.3. M-100

Een benzine-auto kan worden afgesteld op methanol (M-100). In o.a. de VS en de BRD zijn uitgebreide proefnemingen aan de gang. Methanol wordt geproduceerd uit steenkool of aardgas. Er treden slechts geringe veranderingen op in vermogen, motorrendement en voertuiggewicht [15]. In Nederland is een optische sensor ontwikkeld waarmee voertuigen, in combinatie met bijv. elektronische injectie, op wisselende mengsels benzine/methanol/ethanol kunnen rijden (Fuel Flexible Vehicles) [17,18]. Ford denkt deze FFV's op de markt te kunnen brengen tegen \$ 300 à \$ 400 meerprijs t.o.v. benzine-auto's [16]. In Duitsland (BRD) verwacht men dat een M-100 personenauto 5% duurder zal zijn dan een benzine-auto [19].

Gerekend wordt daarom met f 800,- meerkosten voor een M-100-auto t.o.v. een benzine-auto. De onderhoudskosten zullen bij M-100 ook iets hoger liggen. De afleveringskosten van de brandstof liggen hoger vanwege de 2 x lagere energiedichtheid van methanol t.o.v. olieprodukten. Bij tankauto-transport à f 5,- + f 0,25 x km per ton, over 150 km, komt dit neer op ca. f 2,-/GJ hogere afleveringskosten.

Voor de maximale penetratie van M-100 lijken geen wezenlijke belemmeringen aanwezig. M-100 waar thans mee wordt gereden bestaat voor 90% uit methanol en voor 5 à 9% uit koolwaterstoffen [19].

3.1.4. E-100

Een benzine-auto kan worden afgesteld op ethanol (E-100). In Brazilië rijden enkele miljoenen auto's op ethanol. Daarnaast wordt het gebruikt in o.a. de VS, Frankrijk, Zweden en Zimbabwe. Ethanol wordt geproduceerd uit landbouwgewassen zoals suikerriet of graan. In grote lijnen geldt voor E-100 hetzelfde als voor M-100 wat betreft motorvermogen, rendement en voertuiggewicht. De afleveringskosten zijn iets lager dan bij methanol door de $1\frac{1}{2}$ x hogere energiedichtheid van ethanol. Maximale penetratie is niet mogelijk omdat 's winters vanwege motorstartproblemen minder ethanol gebruikt kan worden en vanwege de beperkte beschikbaarheid van ethanol op de energiemarkt (zie hoofdstuk 4). E-100 in Brazilië bestaat thans voor ca. 80% uit ethanol en ca. 20% uit koolwaterstoffen [20].

3.1.5. Elektrische auto's

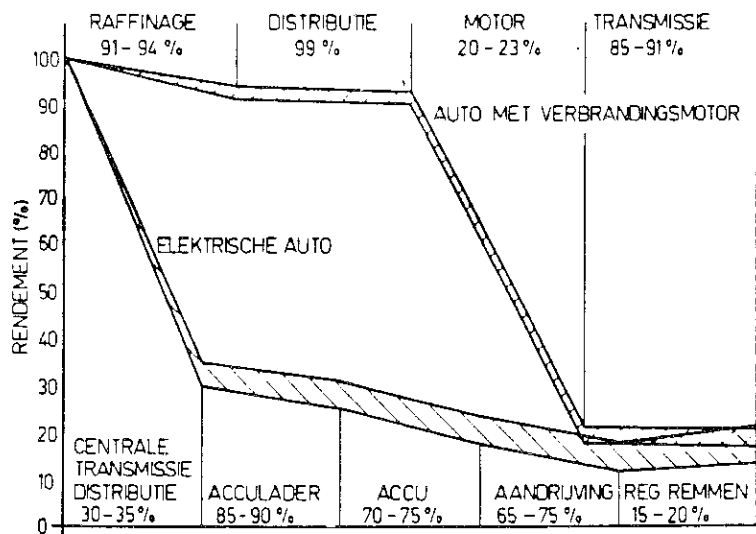
Een auto met elektrische aandrijving heeft een aantal milieuvordelen boven de benzine-auto zoals minder lawaai en geen uitlaatgassen, en rijtechnische voordelen zoals een gelijkmatiger accelleratie. Wat (primair) energiegebruik betreft is er in de huidige nationale energieuishouding weinig verschil (zie figuur A.3).

Het nadeel van elektrische auto's is de opslag van elektriciteit. De energiedichtheid van een accu geladen met elektriciteit is ordes van

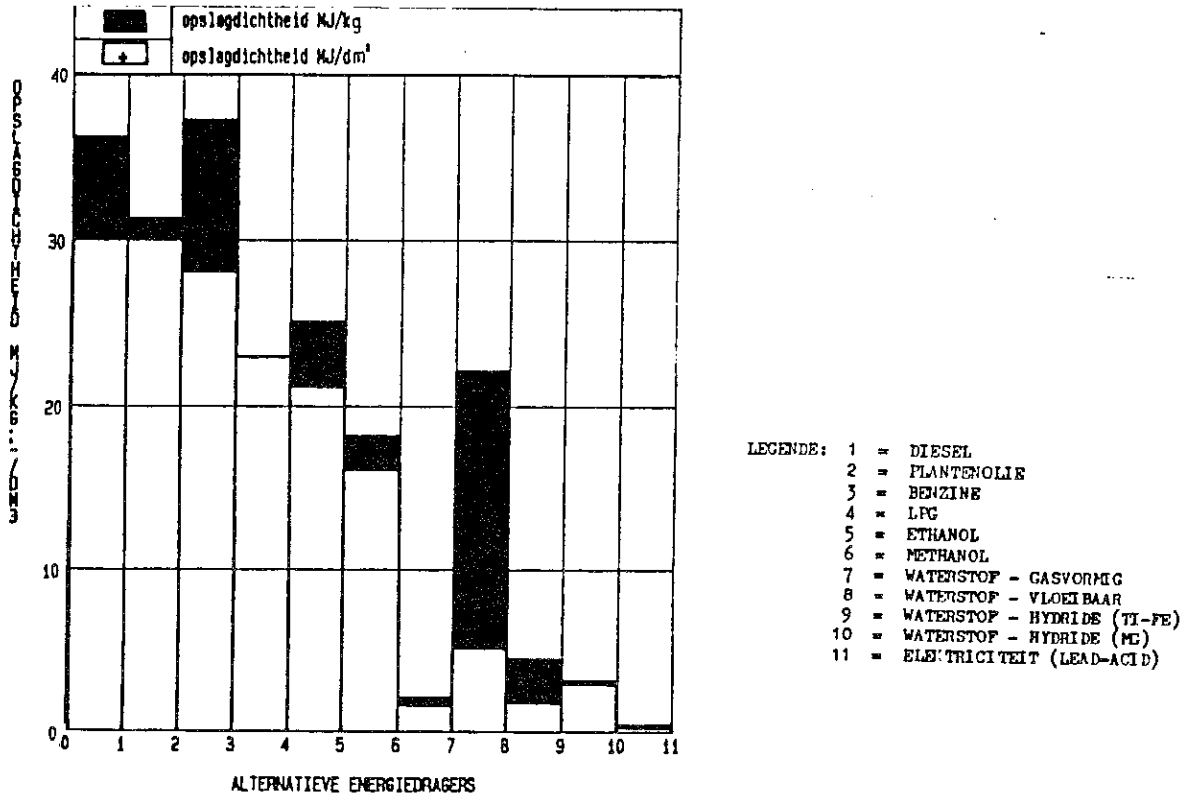
grootte lager dan van een tank gevuld met benzine (zie figuur A.4). Bovendien vergt het opladen van accu's de nodige tijd. Een elektrische auto zal daardoor zwaarder worden terwijl de actieradius beperkt is. Bij gebruik van lood-accu's kan een auto met 450 kg accu's (1/3 deel van het voertuiggewicht) toch nog slechts 100 km afleggen voordat de accu's leeg zijn (zie figuur A.5) [27]. Er zijn betere accu's in ontwikkeling. Het verbeteringspotentieel is echter theoretisch beperkt; ook bij betere accu's blijft het nadeel van elektriciteitsopslag dus bestaan.

Er zijn twee elektrische personenauto's gemodelleerd voor deze studie:

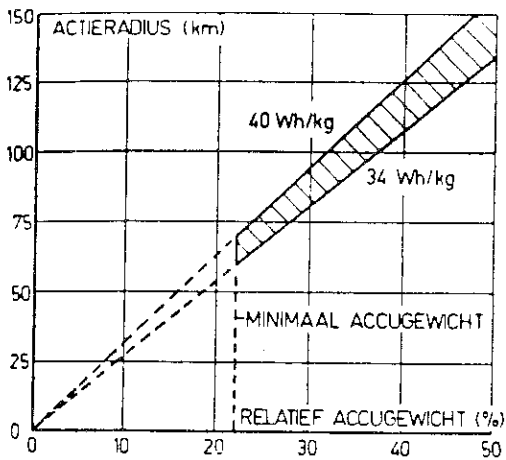
- Elektrische stadsauto (electric city car);
- Elektrische auto met wissel-accu (battery module car).



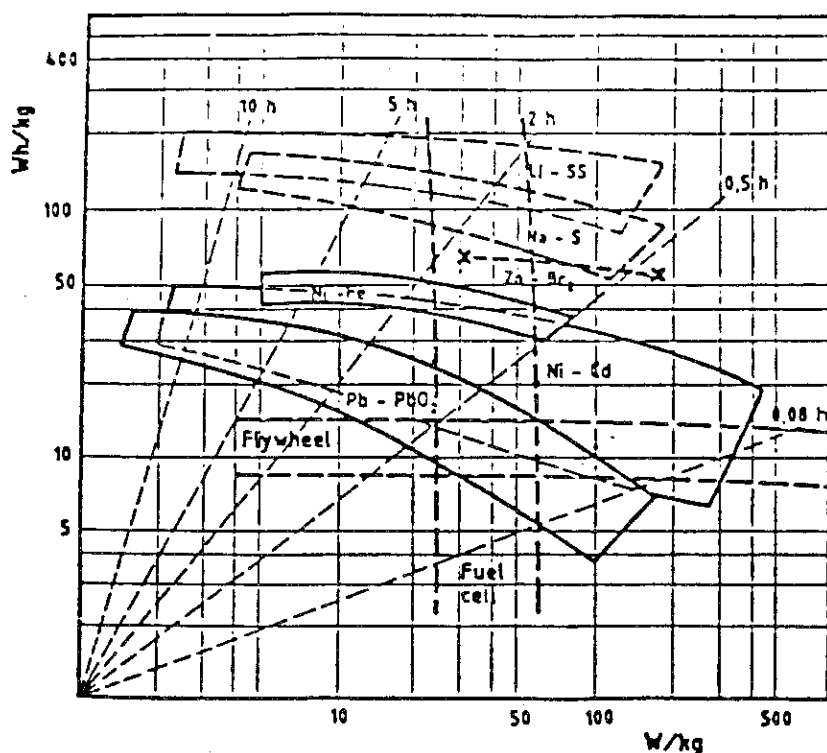
Figuur A.3.: Primair energiegebruik door elektrische en door conventionele voertuigen, uitgaande van ruwe olie



Figuur A.4.: Massa- en volume-specifieke energieopslagdichtheden van alternatieve secundaire energiedragers



Figuur A.5.: Actieradius als functie van het relatieve accugewicht [27]



Figuur A.6.: Specific energy against specific power for various energy conversion and storage systems [28]

3.1.6. Elektrische stadsauto (electric city car)

De elektrische stadsauto rijdt betrekkelijk korte afstanden met grote onderbrekingen. Het kan gaan om een vloot bedrijfswagens voor lokaal gebruik, korte afstands forensenverkeer of tweede auto's. De auto heeft een actieradius van ca. 100 km. De accu wordt voornamelijk 's nachts opgeladen (gebruik ca. 4000 kWh/jaar). Het maximaal markt-aandeel is beperkt.

De elektrische stadsauto wijkt af van de benzine-auto op de volgende punten:

Benzinemotor is vervangen door een elektromotor. De auto is voorzien van lood-accu's, een accu-oplaad-systeem, is groter/zwaarder vanwege de ruimte en het gewicht van de accu's, en de accu heeft extra onderhoud nodig. Aan de andere kant is er minder motorslijtage, geen uitlaat/uitlaatgasbehandeling en zijn benzinetoevoer en -distributie

niet nodig. Olie-import, raffinage, elektriciteitsopwekking en -distributie etc. worden elders in het model verrekend.

In diverse landen zijn al vele jaren proefnemingen aan de gang met elektrische stadsauto's. De meeste autofabrikanten doen hieraan mee, veelal met afzonderlijke proefmodellen. Incidenteel zijn fleettests uitgevoerd.

In de huidige situatie zou een elektrische auto duurder zijn dan een benzine-auto, o.a. vanwege het hogere gewicht/zwaardere constructie. Bij massaproductie zou het verschil in kosten vergeleken met gangbare benzine-auto's (Fiat-900, Panda, VW-golf) volgens opgave van diverse autofabrikanten 10 à 40% bedragen. Als gemiddelde wordt hier gerekend met 20% toename t.o.v. de benzine-auto, analoog aan [28]. Daar komen dan nog de kosten van een accupakket met bedrading en aansluiting bij, van ca. f 4.000,- [28]. De INV-cost bij een nuttige energievraag van 7,2 GJr/y komen daarmee op:

$$2090 + 418 + \frac{4000}{7,2} = 3065 \text{ f,-/GJr/y}$$

De onderhoudskosten liggen lager. Een elektromotor vergt minder onderhoud dan een benzinemotor en er is (althans volgens [28]) ook minder bandenslijtage, waardoor de O+M-costs ca. 40% lager liggen dan bij een benzine-auto, ofwel op $135 \times 0,6 = 80 \text{ f,-/GJr}$. Echter de levensduur van de accu is beperkt. De huidige lood-accu's zouden 600 à 1200 cycli meegaan. Dit betekent dat gemiddeld eens per 3 à 5 jaar het accu-pakket verwisseld moet worden. Statiegeld, inruilwaarde en uitvoeringskosten meegerekend zou dit op ca. f 700,-/ jaar uitkomen, ofwel f 100,-/GJr.

De delivery-costs (afleveringskosten van de brandstof) zijn lager dan bij benzine. Er is een investering nodig voor oplaad-apparatuur en een nachtstroommeter. Bij een investering per voertuig van f 1.000,- en een levensduur van 20 jaar komt dit neer op f 4,-/GJe.

Milieu-voordelen elektrische auto

Het is te overwegen aan een elektrische auto extra waarde toe te kennen vanwege milieuvoordelen boven de benzine-auto, zoals vermindering van $\text{NO}_x/\text{CO}/\text{VOS}$ -emissies [49], verbetering luchtkwaliteit in steden, minder geluidshinder etc. Wat betreft $\text{NO}_x/\text{CO}/\text{VOS}$ - of CO_2 -emissies houdt het model al rekening met te variëren landelijke emissieplafonds zodat dit effect naar believen meerekent.

Voor wat betreft de verbetering van luchtkwaliteit in de steden lijkt dit voor Nederland minder relevant dan elders in Europa, vanwege klimaat-, stedenbouw- en energiever verschillen. De ligging aan zee en de overwegend hoge windsnelheid in de verstedelijkte gebieden (Randstad) maken dat minder frequent luchtstagnatie optreedt. Daarbij is de Randstad zo gebouwd (3 steden met een "groen hart") dat de verkeersdichtheid niet zo hoog is als in sommige andere grote Europese agglomeraties. Tenslotte is van belang dat de emissies van CO/roet uit overige bronnen (kolenkachels bijv.) vanwege de hoge penetratiegraad van aardgas in Nederland lager is dan in andere Europese steden zodat, afgezien van ozon uit CO/VOS, zelden overschrijding van luchtkwaliteitsnormen optreedt. Alleen bij roet-emissies door zware dieselveertuigen zal dit effect worden meegenomen.

Voor wat betreft overige nadelige milieu-effecten zoals verkeersrisico's, schrootverwerking, afgewerkte motorolie, accu-recycling etc. treden eveneens verschillen op die echter moeilijk te kwantificeren zijn. Voorlopig wordt aangenomen dat bij elektrische versus benzine-auto's deze milieu-effecten elkaar in evenwicht houden.

Blijft over de geluidshinder: een elektromotor maakt minder lawaai dan een benzinemotor. Wat de baten zijn van het verminderde motor-lawaai is moeilijk precies vast te stellen. In Nederland wordt momenteel jaarlijks bijna honderd miljoen gulden uitgegeven aan geluidshinderbestrijding bij wegverkeer [30]. Deze uitgaven nemen toe. De

schade door geluidshinder kan maar ten dele berekend worden (in de vorm van waardedaling van huizen bijvoorbeeld 80 miljoen gulden per jaar + 1674 miljoen gulden gecumuleerd [31]) en valt verder vooral in een immateriële categorie (geluidsbeleving). Als indicatieve schatting wordt aangenomen dat de schade door geluidshinder in Nederland in de orde van een miljard gulden per jaar ligt (tevens de richtwaarde voor de overheidsuitgaven voor geluidshinderbestrijding).

Verkeerslawaaï heeft een belangrijk aandeel in de geluidshinder. Daarbij zijn motorlawaaï en weglawaaï te onderscheiden. In stadsgebieden, bij lage snelheden en veelvuldig accellereren, is motorlawaaï dominant; juist op dit punt biedt de elektrische stadsauto voordelen. Gesteld dat volledige vervanging van bezine-auto's door elektrische personenauto's de geluidshinder met 25% zou terugdringen (aangenomen dat de helft van de geluidshinder van personenauto's komt en daarvan weer de helft door motor-lawaaï) dan zou dat een voordeel opleveren van 250 miljoen gulden per jaar, ofwel bij de huidige energievraag: f 7,50/GJr. Bij elektrische stadsauto's zou dit voordeel kunnen oplopen tot f 10,-/GJr. De O+M-costs worden hiermee verlaagd. In de praktijk zou dit de vorm aan kunnen nemen van een gemeentelijke subsidie op onderhoudswerkplaatsen voor elektrische auto's, of een extra geluidsbelasting op benzine.

Aangetekend wordt dat het hierbij om een ruwe indicatie gaat van dit soort milieuvoordelen van de elektrische auto, die nader onderzocht zou moeten worden. De schatting valt overigens nog ruim binnen de onzekerheidsmarge in de jaarkosten (O+M f 100,-/GJr) voor het vernieuwen van de accu. De modelkarakteristieken van de elektrische stadsauto komen daarmee op:

INV	:	3065 f,-/GJr/y
O+M	:	(80 + 100 - 10) 170 f,-/GJr
Deliv.:		4 f,-/GJe

Dit type elektrische stadsauto zou vanaf 1995 beschikbaar kunnen zijn. De maximale marktpenetratie zou zich in eerste instantie beper-

ken tot niet meer dan 5% (ter vergelijking: "bestelauto's hebben een aandeel van 6,5% in de huidige personenauto-vervoersprestatie in Nederland). Het energetisch rendement van de auto (van elektriciteit uit het net naar nuttige energie aan de wielen) zou ca. 45% zijn [27] (acculader 85%, accu 70%, aandrijving 75%; zie figuur A.3). Het hogere voertuiggewicht in aanmerking genomen 40%. Het laden van de accu's zal voornamelijk 's nachts geschieden.

Technologische ontwikkeling

Na 1995 kan de elektrische stadsauto diverse verbeteringen ondergaan. Het energetisch rendement kan toenemen, door betere accu's/acculaders en rem-energie-opslag, tot 60% (acculader 90%, accu 75%, aandrijving 75%, rem-energie-opslag 120%) (inclusief hoger voertuiggewicht: 55%).

Van belang is de ontwikkeling van verbeterde accu's. De energiedichtheid zou een factor 2 à 3 hoger kunnen liggen dan bij de lood accu (zie figuur A.6). Ontwerpers zijn meestal optimistisch over deze nieuwe accu's, in de praktijk worden echter nog steeds voornamelijk loodaccu's toegepast. Welke nieuwe accu het meest geschikt zal blijken voor elektrische personenauto's valt nu dan ook nog niet te zeggen, de nieuwe accuconcepten hebben voor- en nadelen [28,29]. De NiFe-accu heeft robuustheid en lange levensduur als voordelen, nadeel is de hoge prijs. De ZnBr-(of -Cl)-accu heeft hoge energiedichtheid, diepe ontlading, gescheiden elektrolytopslag en potentieel goedkopere massaproductie (kunststof elektroden) als voordeel, nadeel is de hoge werkteemperatuur (320°C resp. 130°C). Ook de NaS-accu heeft een hoge werkteemperatuur. Aangenomen wordt dat een van de hoge-energiedichtheid-accu's (ZnBr, NaS of Li) vanaf 2000 voor een wezenlijke verbetering kan gaan zorgen waarbij de kosten van het accupakket uiteindelijk met 25% verminderd kunnen worden, terwijl de actieradius van de auto en daarmee de maximale marktpenetratie nog wat toenemen. Ter vergelijking: volgens [44] zou een NaS-accu bij serieproductie ca. 3.000 DM kosten en het energetisch rendement van een NaS-electric

city car 57% kunnen zijn. De modelkarakteristieken voor de elektrische stadsauto medio 2015 komen daarmee op:

$$\begin{array}{l} \text{INV} : 2090 + 418 + \frac{3000}{7,2} = 2925 \text{ f,-/GJr/y} \\ \text{O+M} : \quad \quad \quad 145 \text{ f,-/GJr} \\ \text{Deliv.:} \quad \quad \quad 4 \text{ f,-/GJe} \end{array}$$

3.1.7. Elektrische auto met wisselaccu's (battery module car)

De elektrische personenauto met wisselaccu's is gedacht als een substituuat voor de benzine-auto, zoals die heden ten dage gebruikt wordt. Deze auto heeft een pakket gestandaardiseerde accu's die bij accuwisselstations (vergelijkbaar met benzinstation) langs de weg ingewisseld kunnen worden. Om logistieke redenen worden de accu's voor een belangrijk deel overdag opgeladen in basislast. Uiteraard moet een netwerk van accuwisselstations worden opgebouwd. Het kan ook zijn dat er voor dit soort stations in de toekomst snellere accu-opladingssystemen beschikbaar komen (supergeleiding); dan zou er dus sprake zijn van acculaadstations.

Een grootschalige overstap op elektrische auto's en de opbouw van een netwerk van accuwissel- of -laadstations zal de nodige voeten in aarde hebben. Dit type auto is echter in het model zo geparame-teriseerd dat de elektrische stadsauto eerder aantrekkelijk is. Dit betekent dat een grootschalige overstap op elektrische personenauto's met wisselaccu's pas zal plaatsvinden nadat de elektrische stadsauto is geïntroduceerd. Aangezien de elektrische auto met wisselaccu's een meer volwaardige vervanger is van benzine-auto kan de maximale markt-penetratie hoger zijn dan bij de elektrische stadsauto (80%).

De elektrische auto met wisselaccu heeft, vergeleken met de elektrische stadsauto als verschil het systeem met wisselaccu's. Wanneer voor iedere auto een extra accupakket in omloop zou zijn dan komt de initiële investering hoger uit. De accu zal echter minder snel vervangen hoeven worden; hoeveel minder is moeilijk te zeggen omdat de

levensduur van de accu niet alleen met het aantal cycli maar ook met het aantal jaren samenhangt. Al met al zullen er naar schatting ca. 50% meer accu's dan voertuigen in omloop moeten zijn. De vernieuwing van de accu na 3 à 5 jaar komt dan tot uiting in de prijs van de wisselaccu bij het wisselstation. De investeringskosten voor deze auto komen daarmee (vergelijk de elektrische stadsauto) op:

$$2090 + 418 + \frac{4000}{7,2} + \frac{2000}{7,2} = 3340 \text{ f,-/GJr/y}$$

De O+M komt iets hoger uit doordat het geluidshindervoordeel bij de elektrische wisselaccu-auto lager (f 5,- i.p.v. f 10,-) uitvalt:

$$80 + 100 - 5 = 175 \text{ f,-/GJr}$$

De elektrische auto met wisselaccu's zou vanaf 2000 beschikbaar kunnen zijn en daarna dezelfde verbeteringen (betere accu) kunnen ondergaan als de elektrische stadsauto, medio 2020 komt de INV op:

$$3135 \text{ f,-/GJr/y en O+M op: } 150 \text{ f,-/GJr}$$

De delivery costs (afleveringskosten elektriciteit) zullen hoger zijn, bijvoorbeeld vanwege de bediening van de wisselstations. Aangenomen dat het verwisselen en herladen van een accupakket 4 manminuten kost (à f 60,-/manuur) en dat de accu-oplading 30 kWh belooft dan komt de del.costs op f 40,-/GJe. Door automatisering of overgang op laadstations zou dit in de latere periode wellicht kunnen dalen tot f 20,-/GJe.

Het energetisch rendement zal aanvankelijk gelijk zijn aan de elektrische stadsauto (40%); verbetering is slechts mogelijk tot 50% omdat opslag van rem-energie minder zoden aan de dijk zet als bij elektrische stadsauto's; de elektrische auto met wisselaccu's zal immers net als de huidige benzine-auto de meeste kilometers op de snelweg afleggen.

3.1.8. Stirlingmotor-hybride

In principe zijn allerlei combinaties mogelijk van elektrische auto's en verbrandingsmotoren. Als voorbeeld van zo'n hybride-voertuig is een stirlingmotor/elektromotor-combinatie uitgewerkt. Deze bestaat uit een stirlingmotor van 25 à 40 kW (hete-lucht-motor met uitwendige verbranding), vrije zuiger, oscillerende generator, elektromotor en accu. Dit hele aandrijfsysteem zou duurder zijn dan een dieselmotor en rond het jaar 2000 op de markt kunnen komen [56]. Aangenomen wordt dat de meerkosten t.o.v. diesel aanvankelijk f 4.000,- bedragen en in de periode na 2000 door massaproductie en leereffecten dalen tot f 2.000,-. De INV-cost bij een nuttige energievraag van 7,2 GJr/y komen daarmee op:

$$2470 + \frac{4000}{7,2} = 3025 \text{ f,-/GJr/y; dalend naar } 2750 \text{ in } 2020.$$

Voor wat betreft onderhoudskosten (O+M-costs) is een voordeel dat de stirlingmotor geen motorolie behoeft, een nadeel is o.a. dat de hete kop regelmatig gereinigd moet worden. Aangenomen is dat de O+M-costs relatief op hetzelfde niveau liggen als bij dieselauto's, d.w.z. 157 f,-/GJr; dalend naar 143 in 2020.

Een stirlingmotor kan in principe alle brandstoffen gebruiken (uitwendige verbranding). Voor het model zijn olieprodukten (m.n. LPG, diesel) als brandstof aangenomen, met dezelfde delivery costs.

Het mechanisch rendement van een stirlingmotor kan (ondanks het betrekkelijk kleine vermogen) hoog zijn, mede dankzij de combinatie met vrije zuiger en accu, wat stationair bedrijf mogelijk maakt. Gerekend wordt met een stirlingmotorrendement van 35% [57]. Daarnaast tellen mee: het generatorrendement van (90%), het rendement van de elektromotor/aandrijving (75%, zie §3.1.6) en accuverliezen (slechts een deel van de tijd; gemiddeld 90%). Het overall-rendement (brandstof naar wielen) komt daarmee op:

$$0,35 \times 0,9 \times 0,75 \times 0,9 = 21,3\%$$

In de periode na 2000 kan het mechanisch rendement van de stirlingmotor toenemen tot 40% [57]. Daarnaast zou rem-energie-opslag mogelijk zijn waardoor het rendement gemiddeld met ca. 10% toeneemt (20% in de stadscyclus (§3.1.6), minder op de grote weg). Het overall-rendement (brandstof naar wielen) medio 2020 komt daarmee op:

$$0,4 \times 0,9 \times 0,75 \times 1,1 \times 0,9 = 26,7\%$$

De emissies van NO_x zijn als gevolg van de externe verbranding bij een stirlingmotor aanmerkelijk lager dan bij de huidige automotoren (zuigermotor met interne verbranding). In [57] is een NO_x -emissie van 57 g/GJ berekend. Ook de VOS/CO-emissies zullen, door het stationaire bedrijf en om roetvorming te voorkomen, aanmerkelijk lager zijn dan bij de huidige automotoren.

3.2. Stads- en streekbussen

Bijna alle bussen in Nederland rijden op diesel. Voor stadsbussen zijn veel verschillende alternatieve brandstoffen of aandrijvings-systemen mogelijk. Op dit gebied is nogal wat ontwikkelingswerk gaande. Stads- en streekbussen nemen echter slechts een gering deel (ca. 0,2%) van het Nederlands energieverbruik voor hun rekening, zodat de keuze voor een alternatief vanuit nationaal energie-oogpunt niet zo belangrijk is. Binnen de stadsbus-sector is het desondanks van belang welke van de vele alternatieven in een macro-economische optimalisatie vanuit energie- en milieu-oogpunt de voorkeur zou verdienen. Uit de verschillende alternatieven zijn daarom een zestal gekozen die verschillend op de modelrandvoorwaarden reageren:

- Dieselbus;
- Dieselbus met rem-energie-opslag;
- Elektrische trolleybus;
- Elektrische bus met accu's;
- Brandstofcelbus met vliegwiel;
- CNG-bus.

De modelkarakteristieken zijn samengevat in tabel A.5 en A.6.

Brandstof	Investering f/GJr/y	Onderhoud f/GJr	Aflevering brandstof f/GJ	Start	Max.aandeel
Diesel	1800	370	5,7		
Diesel met remopslag ¹	2020	370	5,7	1990	75%
Elektrische trolley ¹	2700	620->420	-	1995	10%
Elektrische accu ¹	2350->2250	470->445	-	2000	30%
Brandstofcel +vliegwiel ¹	3600	625->530	-	2000	30%
CNG-97/El.3 ¹	1895	420->410	8	1995	75%

¹ Gewijzigd t.o.v. [2]

Tabel A.5.: Uitgangsgegevens stads- en streekbussen

Toelichting:

Investering en onderhoud per GJr (= road) nuttige energie op de weg.
Afleveringskosten per GJ finale energie in brandstof.

Brandstof	1980	1985	1990	2000	2010	2020
Diesel	19,7	20,6	21,4	23,0	24,2	25,5
Diesel met remopslag ¹			28,5	30,7	32,3	34,0
Elektrische trolley ¹			70	70	70	70
Elektrische accu ¹				40		55
Brandstofcel +vliegwiel ¹					31,0	32,7
CNG-97/El.3			20,1	21,6	22,7	24,0

¹ Gewijzigd t.o.v. [2]

Tabel A.6.: Energetisch rendement stads- en streekbussen (%),
verloop in de tijd

Toelichting:

Voertuigrendement, dus inclusief acculaad-, deellast- en transmissie-
verliezen; van GJ finale energie (brandstof of elektriciteit) naar GJ
nuttige energievraag. Zie ook toelichting bij tabel 4.

3.2.1. Dieselbus

De bussen in Nederland gebruikten in 1985 7,2 PJ diesel. Slechts een deel (ca. 2/3) van de busvervoersprestatie wordt door stads- en streekbussen geleverd. Aan de andere kant heeft een klein deel van de vrachtvervoersprestatie (bijv. winkelwagens, wagen van reinigingsdiensten) een met stadsbussen vergelijkbare bedrijfskarakteristiek (lage snelheid, veelvuldig stoppen, vaste route, in eigendom bij semi-overheid, etc.). In deze studie wordt het energieverbruik door bussen volgens [32] toegerekend aan stads- en streekbussen en vergelijkbare lokale voertuigen.

De 10.900 bussen in Nederland gebruikten 7,2 PJ diesel in 1985 [32]. Een diesel-stadsbus kost ca. f 245.000,- [33]. Bij een energetisch rendement (brandstof -> wielen) van 20,6% komt dit neer op INV = f 1.800,-/GJr/jaar.

De onderhoudskosten van de bus zijn f 0,82/bus.km [33]. Bij een busverkeersprestatie van $671 \cdot 10^6$ bus.km [32] in 1985 komt dit neer op f 370,-/GJr.

Voor de afleveringskosten van de brandstof wordt hetzelfde gerekend als bij dieselauto's.

3.2.2. Dieselbus met rem-energie-opslag

Bij het remmen gaat kinetische energie verloren. Omdat een stadsbus vaak remt (stoplichten, haltes) is rem-energie-opslag, in vliegwiel, hydraulische of pneumatische systemen, een energiebesparingsmogelijkheid. Er zijn proefprojecten uitgevoerd in Nederland [34].

Volgens gegevens van MAN, geciteerd in [35], zou een vliegwielstelsel leiden tot een extra investering van 3 à 5% en een brandstofbesparing van 10 à 20%. In [35] wordt gerekend met een investering voor een vliegwielmodule van f 42.000,- à f 56.000,-. Volgens [34] kost een

diesel-stadsbus uitgevoerd met een hydraulisch rem-energie-opslag-systeem f 50.000,- meer en is hiermee in een praktijkproef een brandstofbesparing van 30 à 35% gerealiseerd.

In deze studie wordt mede n.a.v. [56] gerekend met een extra-investering van f 30.000,- per bus en 25% brandstofbesparing bij rem-energie-opslag.

De onderhoudskosten zijn niet veranderd. Het rem-energie-opslag-systeem vergt uiteraard onderhoud, maar aan de andere kant zijn er minder onderhoudskosten doordat de remmen en de dieselmotor (meer stationair bedrijf) minder belast worden. Volgens [34,35] is er daardoor geen toename van de onderhoudskosten. Het maximaal marktaandeel wordt geschat op 75%.

3.2.3. Elektrische trolleybus

In sommige grote Europese steden rijden trolleybussen (in Nederland alleen nog in Arnhem). Varianten zijn trolleybussen waarbij de bovenleiding gedeeltelijk is vervangen door elektrische tappenpunten bij halteplaatsen met energie-opslag (gyro) of een dieselmotor of accu-systeem voor korte overbruggingen (dual-mode). Er wordt dan dus minder geïnvesteerd in bovenleiding, maar meer in accu's, vliegwielen of dieselmotor-generator. Voor het model maakt dat weinig uit. Wel relevant is het patroon van het elektriciteitsgebruik door de trolley of trolleyvariant: dit volgt ongeveer het landelijk gebruikspatroon.

Een trolleybus is duurder dan een dieselbus. Volgens [33] is een moderne trolleybus, met energiezuinige chopper-regeling, meer dan 2x zo duur als een dieselbus. De langere levensduur en de hogere restwaarde van de trolley in aanmerking genomen leidt dit tot 86% hogere kapitaalskosten [33]. Een eerdere studie van dit bureau kwam op aanmerkelijk lagere kapitaalskosten uit [35]. De vaste materieelkosten (waarin naast bus ook stalling e.d. is begrepen) zijn volgens [33] 48% hoger.

Volgens [36] zijn de kapitaalskosten voor een trolleybus ca. 32% hoger dan voor een dieselbus, terwijl voor de zes door [36] onderzochte dual-mode-bussen het verschil gemiddeld 40% is.

Vanwege de grote onzekerheden wordt in deze studie als ruw gemiddelde gerekend met 50% hogere investeringskosten.

De onderhoudskosten van een trolleybus zijn volgens [33] f 0,90/bus.km, ofwel 10% hoger dan bij de dieselbus. Volgens [37] daarentegen kunnen de onderhoudskosten 25% lager liggen. [36] geeft geen details maar stelt dat de onderhoudskosten kunnen dalen tijdens de levensduur van de trolleybus, waarbij er op gelet moet worden geen onnodig (maar bij dieselbussen standaard-) onderhoud uit te voeren. Vanwege de onzekerheden wordt in deze studie gerekend met dezelfde onderhoudskosten als een dieselbus.

Een trolleybus heeft milieuvoordelen ten opzichte van een dieselbus. Veranderingen in NO_x -, SO_2 -, CO/VOS - en CO_2 -emissies worden elders in het model meegewogen. Verminderde geluid- en roet-emissies worden als vermindering van O+M-costs meegerekend.

Voor geluidshindervermindering bij elektrische stadsauto's werd f 10,-/GJr berekend (paragraaf 3.1.). Bij stadsbussen zal dit verschil wat groter zijn. Een illustratie is het ombouwen van 600 Nederlandse stadsbussen enige jaren geleden [4]. Voor f 10.000,- per bus zijn omkapselingen aangebracht waardoor de geluidsemisatie verminderd werd. Bij levensduur van 15 jaar, discontovoet 5%, komt dit neer op f 7,-/GJr. Daarnaast nemen echter ook de onderhoudskosten toe (motor moeilijker bereikbaar, vernieuwing isolatiemateriaal etc.). Bovendien is de geluidsemisatie niet volledig geëlimineerd door een omkapseling. f 20,-/GJr lijkt zodoende een redelijke schatting voor de baten van geluidshindervermindering door een trolleybus.

Een trolleybus produceert geen roet. De roet-emissies door dieselbussen kunnen voor ca. 80% beperkt worden door het monteren van roetfilters. Zo'n roetfilter zou ca. f 80.000,- kosten en 180.000 km meegaan, volgens [38]; bij Nederlandse bussen komt dit neer op f 20,-/GJr ; afgezien van een eventuele vermindering (tot 5% [38]) van het motorrendement. Gerekend wordt met f 30,-/GJr voor de baten van het afwezig zijn van roetemissies bij een elektrische trolleybus.

Naast investering, onderhoud en milieubaten van de trolleybus zijn er ook kosten voor infrastructuur van het trolleybusnet (bovenleidingen, etc.). Volgens [33] zijn de jaarlijkse infrastructuurkosten per km baanlengte f 84.425,-. Het grootste deel van deze kosten (f 67.468,- ofwel 80%) is voor de niet nader gespecificeerde post "beheer elektrische installaties". Omgerekend naar kosten per bus.km is het verschil tussen trolley- en dieselbus volgens [33] f 1,53. Dit komt neer op f 682,-/GJr (bij een busverkeersprestatie in 1985 van 671.10⁶ en een nuttige energievraag van 1,5 PJr). Wordt echter alleen gerekend met de kapitaalskosten, onderhoudskosten en schoonmaakkosten van de baan, bovenleiding en elektrische installaties (maar dus zonder "beheer elektrische installaties") dan is het verschil tussen trolley en dieselbus volgens [33] f 0,19 per bus.km, ofwel f 85,-/GJr. beheer van elektrische installaties zou in de praktijk door een ander gemeentelijk bedrijf uitgevoerd kunnen worden (GEB) en in de elektriciteitsprijzen verdisconteerd kunnen zijn.

In deze studie wordt als ruwe aanname uitgegaan van infrastructuurkosten van f 300,-/GJr die onder gunstige omstandigheden in de loop der tijd (efficiënter "beheer") kunnen dalen tot f 100,-/GJr.

De post O+M wordt dan $f 370 - 20 - 30 + 300 = f 620,-/GJr$ dalend naar f 420,-.

Het energetisch rendement van een trolleybus met chopper is ca. 70%. De maximale penetratie is beperkt. Volgens [36,37] komen alleen gro-

tere steden zonder tramnet in aanmerking. In Nederland vallen de drie grote steden dan af. Van de 571.10^6 bus.km in Nederland in 1985 werden ca. 120.10^6 redden door stadsbussen (stadslíjndiensten en gemeentelijke vervoerbedrijven). Aangenomen dat de helft hiervan voor trolleybedrijf in aanmerking komt is de maximale penetratie thans 10%.

3.2.4. Elektrische accubus

De modelparameters voor de elektrische accubus (bus met elektromotor-aandrijving en verwisselbaar accukarretje) zijn geschat op basis van andere voertuigen (elektrische personenauto, elektrische trolley). De schatting is tentatief.

Investeringskosten bus met elektromotor: gelijk aan dieselbus (f 245.000,-). Accukarretje: 2000 kg, f 25.000,-. Per bus zijn 3 karretjes nodig, oplading gebeurt met (goedkope) nachtstroom. Vervanging van de accu's na 3 jaar is bij onderhoudskosten meegeteld. Afwezigheid geluidshinder en roet-emissie is meegerekend.

3.2.5. Brandstofcelbus met vliegwiel

De modelparameters voor de brandstofcelbus zijn afgeleid uit [33]. De brandstof voor deze bus is waterstof, waarvoor in het model diverse produktietechnieken zijn opgenomen [2]. De afleveringskosten voor waterstof zijn bij de O+M (onderhoudskosten) meegerekend, afgeleid uit [33]. Er is aangenomen dat de onderhoudskosten zullen dalen door technologische ontwikkelingen op het gebied van brandstofcellen (verlenging levensduur) [54]. Afwezigheid van geluidshinder en roet-emissies is meegerekend (f 50,-/GJr).

3.2.6. CNG-bus

De modelparameters voor de CNG-bus zijn afgeleid van de CNG-vrachtauto, zie paragraaf 3.3. Het gaat om ca. f 13.000,-, meerinvestering en ca. f 40,- à f 50,-/GJr hogere O+M-costs vergeleken met diesel.

3.3. Vrachtauto's

Bijna alle vrachtauto's in Nederland rijden momenteel op diesel. Alternatieve brandstoffen zijn methanol, CNG en wellicht ook brandstoffen uit biomassa. Een heel ander alternatief zou een elektrische vrachtauto zijn. De modelparameters van de in deze studie meegenomen voertuigtypes voor vrachtverkeer op de weg zijn weergegeven in tabel A.7 en A.8.

Brandstof	Investering f/GJr/y	Onderhoud f/GJr	Aflevering brandstof f/GJ	Start	Max.aandeel
Diesel	1750	105	5,7		
M-100	1750	110	8 ¹	1990	50%
M-33/D-67 ¹	1800	110	7,2	2000	90%
CNG-97/El.3 ¹	1875	155->145	8	1990	80%
"E-100" ¹	1750	115	11	1990	80%

¹ Gewijzigd t.o.v. [2,11]

Tabel 7.: Uitgangsgegevens vrachtauto's

Brandstof	1980	1985	1990	2000	2010	2020
Diesel	22,0	23,0	24,0	25,6	27,0	28,4
M-100			23,6	25,3	26,6	28,0
M-33/D-67 ¹				27,1	28,6	30,1
CNG-97/El.3 ¹			22,6	24,1	25,4	26,7
"E-100"			24,0	25,6	27,0	28,4

¹ Gewijzigd t.o.v. [2,11]

Tabel A.8.: Energetisch rendement vrachtauto's (%), verloop in de tijd

Toelichting:

Zie toelichting bij tabel 4.

3.3.1. Dieselyrachtauto

In 1985 werd in Nederland 58,3 PJ diesel gebruikt door vrachtauto's [32] (= vrachtauto's, trekkers voor opleggers en speciale voertuigen;

exclusief bestelauto's die als personenauto's zijn meegeteld). De vervoersprestatie in 1985 van Nederlandse vrachtauto's in binnen- en buitenland ($6,1 \cdot 10^9$ km) is groter dan de vervoersprestatie van vrachtauto's (Nederlandse en buitenlandse) in Nederland zelf ($5,3 \cdot 10^9$ km). Het actieve park Nederlandse vrachtauto's bestond in 1985 uit 128.600 stuks. Er wordt gemakshalve aangenomen dat de vervoersprestatie in Nederland voor rekening komt van de Nederlandse vrachtauto's en dat een vrachtauto f 182.500,- kost (of deze aannames geheel juist zijn is voor het model niet belangrijk).

Bij een energetisch rendement (brandstof -> wielen) van 23% komen de investeringskosten dan op f 1.750,-/GJr/jaar.

Voor de onderhoudskosten is f 105,-/GJr aangenomen, en voor de afleveringskosten van dieselbrandstof f 5,7/GJ net als bij personenauto's of bussen. De levensduur van een vrachtauto is 15 jaar.

3.3.2. M-100

Een alternatieve brandstof is methanol (M-100). Volgens de meeste bronnen is een methanolvrachtauto niet duurder dan een dieselvrachtauto en is het energetisch rendement ongeveer gelijk [15,38]. De onderhoudskosten zijn iets hoger ingeschat (f 110,-/GJr) vanwege het corrosieve karakter van methanol; de afleveringskosten van methanol zijn f 8,-/GJ net als bij personenauto's. De maximale marktpenetratie van M-100 vrachtauto's is vooralsnog beperkt tot 50%, om de volgende redenen:

- Er is een ander type motor nodig (dieselmotor met bougies, of een aangepaste benzinemotor);
- 100% methanolgebruik is niet waarschijnlijk (M-100 bestaat voor 5 à 9% uit koolwaterstoffen, seizoensafhankelijk);
- Een deel (15%) van de vrachtautokilometers in Nederland wordt door buitenlandse vrachtauto's gemaakt: het is de vraag of overgang op M-100 in Nederland en het buitenland gelijktijdig plaats zal vinden.

3.3.3. M-33/D-67

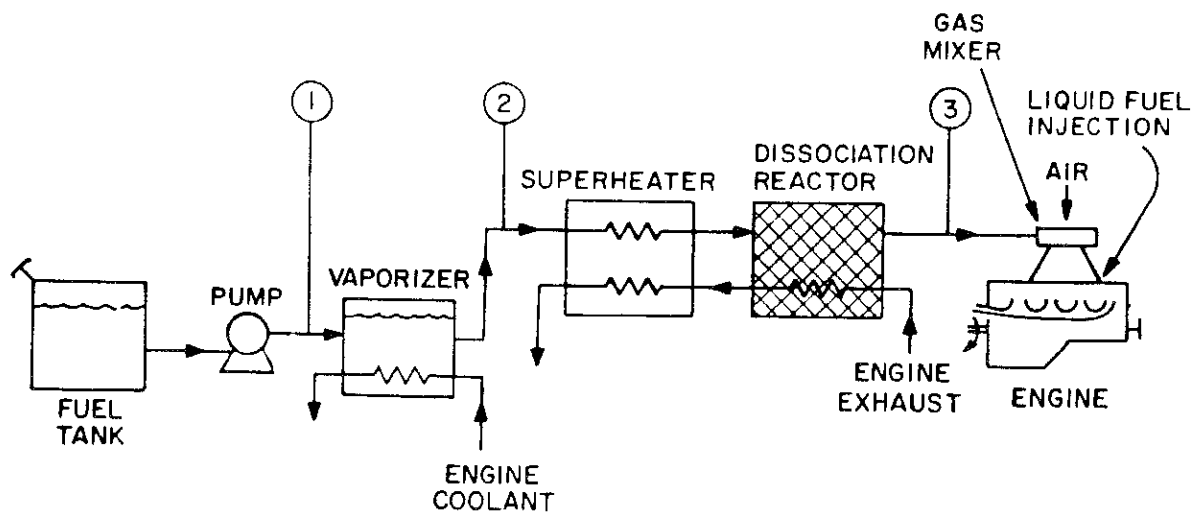
Het is mogelijk methanol en diesel gezamenlijk te gebruiken in een dieselmotor door methanol eerst te verdampen of te dissociëren. Voordeel is dat het energetisch rendement toeneemt doordat de onderste verbrandingswaarde wordt verhoogd met 5% (verdamping), 13% (steamreforming [47]) of 18% (dissociatie, rekening houdend met thermodynamische verliezen [46]).

Methanol-dissociatie ($\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}$) kan plaatsvinden op een katalysator bij 300°C onder toevoer van motorcoolwarmte en uitlaatgaswarmte (zie figuur A.7). Een dergelijk systeem is in ontwikkeling bij TNO in Nederland [46] en in andere landen [47,48]. Goede resultaten zijn behaald bij vervanging van 25-40% diesel (op energiebasis) door methanol.

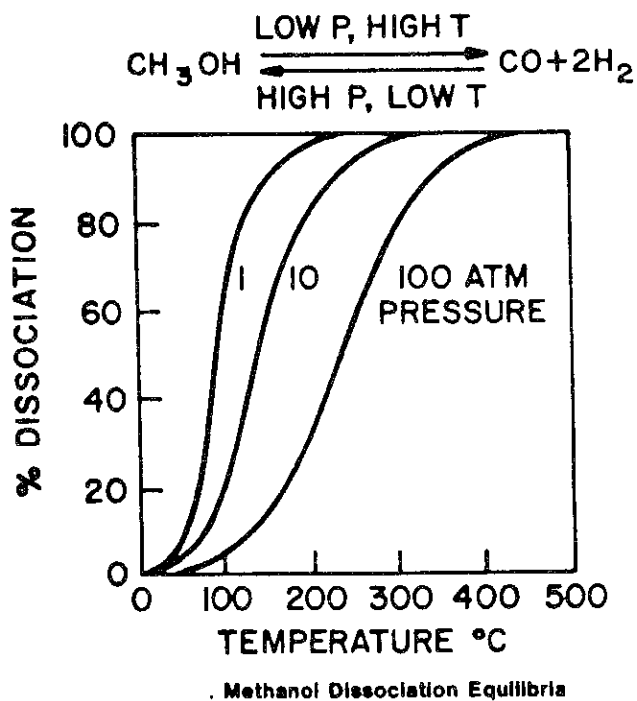
Voor deze studie wordt gerekend met een "mengsel" van 33% methanol en 67% diesel op energiebasis (dit is op volumebasis ongeveer 50/50) en een rendementsverbetering van 6% (1/3 deel van 18%).

De kosten van een dissociatiereactor zijn nog niet bekend. Het prototype heeft meer dan f 10.000,- gekost maar bij serieproductie lijkt een prijsdaling tot enkele duizenden guldens goed mogelijk [46]. Daarnaast zijn warmtewisselaars, sensoren en een aangepaste menging nodig. Voor methanol is bovendien een extra brandstoftank met vulbuis nodig of moet een van de dieseltanks voor methanol worden aangepast. Bij wijze van grove schatting wordt gerekend met f 5.500,- meerinvestering per vrachtauto. De onderhoudskosten zijn iets hoger ingeschat dan voor diesel vanwege het corrosieve karakter van methanol en mogelijke controle/vervanging van katalysatormateriaal.

De emissies van NO_x zullen ongeveer gelijk zijn, de emissies van CO/VOS zouden iets hoger kunnen zijn dan bij een dieselmotor. Overigens zijn dezelfde emissiebeperkings technieken als bij dieselmotoren mogelijk.



Location	Chemical Form	Lower Heating Value
1	CH ₃ OH (liquid)	19958
2	CH ₃ OH (vapor)	21058
3	2H ₂ + CO (gas)	23845



Figuur A.7.: Methanol-dissociatie [47]

3.3.4. CNG

Vrachtauto's kunnen op CNG rijden. Nadeel is dat voor opslag van CNG een 5 à 6x groter volume nodig is dan bij diesel en dat het gewicht van de vrachtauto toeneemt. Door het gewicht van de huidige goedgekeurde typen gasflessen zou, bij een CNG-hoeveelheid equivalent aan 200 liter dieselbrandstof, het gewicht van de vrachtauto met ca. 1000 kg toenemen [12]. Met het ombouwen van dieselmotoren naar gas (o.a. aanbrengen van bougies) is reeds veel ervaring; ook bij total-energy-installaties met stationaire gasmotoren voor warmte-krachtopwekking. Het energetisch rendement wordt bij ombouw van diesel naar gas iets lager [57].

De meerkosten om een vrachtauto te voorzien van CNG, met behoud van de actieradius, worden geraamd op f 10.000,- (ca. 1/3 deel voor de motor, 2/3 deel voor de gasflessen). Daarnaast is er een meerinvestering door de vermindering van de nuttige laadruimte (laadvolume, laadgewicht). Het maximaal laadvolume zou bij een gemiddelde vrachtauto met ca. 2% afnemen, het maximaal laadgewicht met ca. 3%. Omdat in de praktijk de maximale laadruimte lang niet altijd volledig is benut, wordt gerekend met 1½% meerinvestering, ofwel f 3.000,-. Wordt genoeg genomen met een kleinere gasflesinhoud dan komen de investeringskosten lager uit, maar moet wel vaker getankt worden.

Gerekend wordt met een meerinvestering voor een CNG-vrachtauto van f 13.000,- vergeleken met een dieselvrachtauto. De INV-costs komen dan op f 1.875/GJr/y. Daarnaast zijn er extra kosten voor het tanken (investeringen in gascompressoren e.d.), hiervoor wordt uitgegaan van de becijfering voor CNG-personenauto's (zie paragraaf 3.1) gecorrigeerd voor het hogere energetisch rendement). De O+M-costs komen dan f 40,- à f 50,-/GJr hoger uit dan bij dieselvrachtauto's. De afleveringskosten van CNG zijn hetzelfde als bij personenauto's.

3.3.5. "E-100"; Brandstof uit biomassa

Er zijn mogelijkheden om uit biomassa brandstoffen voor vrachtauto's te produceren, bijv. ethanol, plantaardige olie, houtgas of biogas.

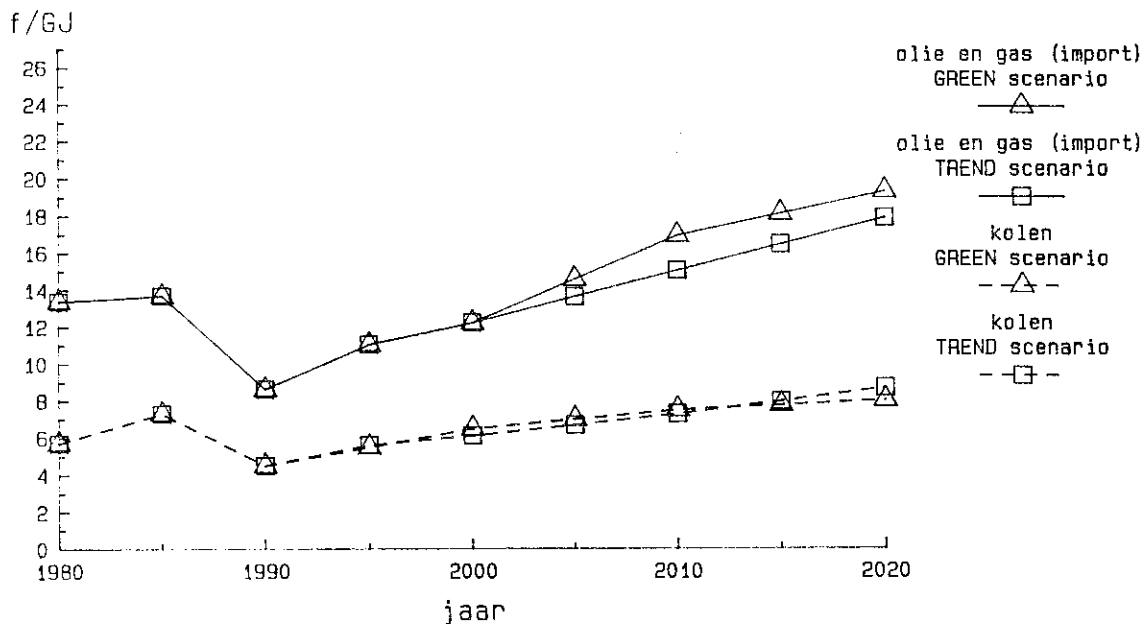
4. BRANDSTOFFEN, MILIEU

In dit hoofdstuk worden overige relevante gegevens besproken:

- Prijs en beschikbaarheid van brandstoffen;
- Milieu-eisen en milieutechnieken.

4.1. Brandstoffen

De brandstofprijzen voor ruwe olie, kolen, importgas en uranium worden hetzelfde genomen als in de EOS-studie. De prijzen in het GREEN-(GO+)scenario worden bewust hoog gehouden door de overheid om energiebesparing uit te lokken. In het TREND(DG+)-scenario stijgen de prijzen door de marktontwikkeling [1,21]. De prijs van geïmporteerd aardgas is, per GJ, gelijk aan de olieprijs. De steenkoolprijzen liggen lager, zie figuur A.8. Toekomstige energieprijzen zijn onzeker. In [1] zijn gevoeligheidsanalyses beschreven waarbij de energieprijzen op een veel hoger niveau liggen of sterk fluctueren.



Figuur A.8.: Prijzontwikkeling brandstoffen

Op de punten van aardgas-beschikbaarheid en ethanol wordt afgeweken van [1].

Aardgas

In de EOS-studie werden de te importeren hoeveelheden aardgas beperkt. Deze beperking wordt opgeheven. Voor de transportsector die voornamelijk op olieproducten draait, maakt opheffen van aardgasimportbeperkingen weinig verschil. Meer aardgasgebruik en -import kan echter van belang blijken om de CO₂-emissie te verlagen.

Ethanol

Ethanol wordt niet uit fossiele brandstoffen geproduceerd, maar uit graan, suikerriet of andere zetmeel-houdende gewassen. Medio 1986 werd wereldwijd omstreeks 500 PJ ethanol als motorbrandstof gebruikt o.a. in Brazilië (400 PJ), de VS (50 PJ) en Zweden (2 PJ). In Nederland is binnenlandse produktie van bio-ethanol niet interessant vanwege gebrek aan voldoende landbouwareaal, in andere EEG-landen zijn echter wel mogelijkheden aanwezig. De EG ziet bio-ethanol als een mogelijke uitweg voor landbouwoverschotten, maar vindt produktie bij de huidige olieprijs niet rendabel. Volgens studies zou op het huidige overschot aan landbouwareaal in de EG (10.10⁶ ha ofwel 20% van de totale EG-landbouwgrond) jaarlijks 1000 PJ bio-ethanol geproduceerd kunnen worden. De huidige produktieprijs is f 30,- à f 40,-/GJ [22,23,24]. Deze prijs is niet gekoppeld aan de ruwe olieprijs maar is afhankelijk van de stand der techniek en (via de graan- of suikerprijs) van de situatie op de wereld-voedsel-markt. Verwacht wordt dat de produktieprijs met minstens 25% kan dalen door technologische ontwikkelingen, zoals membraanfiltratie (i.p.v. destillatie), biotechnologie (speciale energiegewassen en fixed-bed-fermentatie) en in de toekomst wellicht ook ligno-cellulose-fermentatie (versuikering van hout). Verder is een gewasopbrengstverhoging (3 à 10% in de periode tot 2020) te verwachten als gevolg van de stijgende CO₂-concentraties in de atmosfeer [9]. Aangenomen wordt dat in Europa vanaf

het jaar 2000 in Nederland in alle scenario's import van bio-ethanol mogelijk is tegen licht dalende prijzen. De maximaal te importeren hoeveelheid is in het TREND-scenario het grootst en in het GREEN-scenario het kleinst [24].

In het TREND-scenario blijft er sprake van EG-landbouwoverschotten en zou de jaarlijkse 1000 PJ "overschot ethanol" geproduceerd kunnen worden. Voor Nederland kan daarvan een, naar bevolkingsaandeel in de EG evenredig, deel van beschikbaar komen: 50 PJ/jaar.

In het meer op duurzaamheid georiënteerde GREEN-scenario zullen de landbouwoverschotten verminderen en kan voor Nederland niet meer dan 20 PJ/jaar overschot ethanol beschikbaar zijn.

Naast de ethanolproductie in landbouwoverschot-gebieden is uiteraard ook ethanolproductie in reguliere landbouw of aankoop van ethanol van buiten de EG mogelijk. Wordt gerekend met 25% winstmarge en wordt aankoop van akkerbouwgrond à f 20.000,- per ha (buiten Nederland) in rekening gebracht met 5% rente dan komt de "commerciële" ethanolprijs f 20,- per GJ hoger uit. Dit zou in dezelfde orde moeten liggen als de prijs in Brazilië en de kosten van scheepstransport en -overslag van Brazilië naar Rotterdam.

Jaar	2000	2005	2010	2015	2020
Importprijs overschot ethanol (f/GJ)	33	31	29	28	27
TREND max. beschikbaar (PJ/j)	5	20	50	50	50
GREEN max. beschikbaar (PJ/j)	5	10	20	20	20
Importprijs commercieel ethanol (f/GJ)	53	51	49	48	47
TREND max. beschikbaar (PJ/j)	20	30	50	80	100
GREEN max. beschikbaar (PJ/j)	20	30	50	80	100

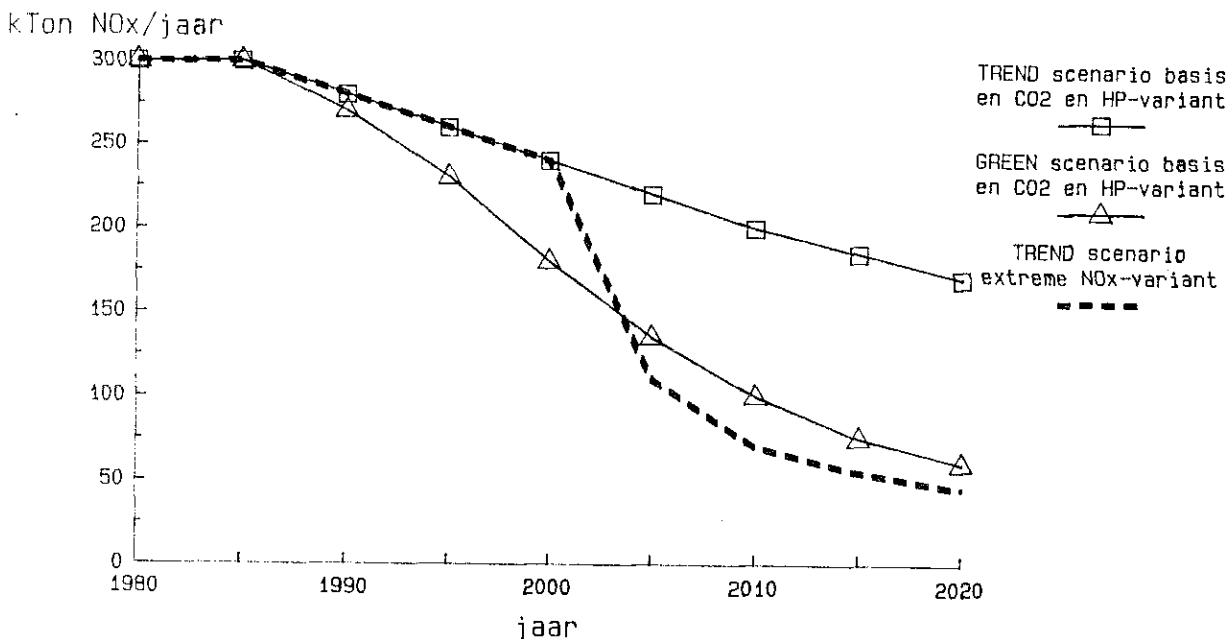
Tabel A.9.: Prijs en beschikbaarheid ethanol (E-100)

4.2. Milieu-eisen

Milieu-eisen zijn het strengst in het GREEN-scenario. De emissieplafonds voor NO_x en CO/VOS worden gelijk genomen aan die in het trendbreuk-scenario [6,7] een reductie met 85% t.o.v. het huidige niveau. Dit gaat iets verder dan het GO-scenario.

Voor wat betreft CO_2 kunnen de emissieplafonds in een gevoeligheidsanalyse worden toegevoegd; het gaat bij CO_2 om een milieuprobleem ("broeikas-effect") met een veel grotere onzekerheidsmarge [9] en tijdsdimensie dan bij NO_x en CO/VOS zodat CO_2 een andere, meer "verkennende" behandeling verdient.

De emissieplafonds in het oorspronkelijke DG-scenario zijn minder streng. In een gevoeligheidsanalyse wordt het TREND-scenario doorge-rekend met veel lagere emissieplafonds, teneinde na te gaan wat een zeer sterke emissievermindering in een scenario van toenemende mobi-liteit voor invloed kan hebben op de in te zetten brandstoffen/voer-tuigtypes.



Figuur A.9.: Emissieplafonds NO_x -transportsector

De NO_x -emissieplafonds zijn weergegeven in figuur A.9. Voor CO/VOS-emissies vindt een proportionele emissievermindering plaats. De emissieplafonds voor NO_x uit stationaire bronnen en voor SO_2 blijven gelijk aan de DG- en GO-scenario's.

Emissie-coëfficiënten en -bestrijdingstechnieken

De emissie-coëfficiënten voor CO_2 zijn berekend in [25].

Voor NO_x zijn de emissie-coëfficiënten en -bestrijdingstechnieken berekend in [3]. Voor wat betreft M-100 zijn deze aangepast in [15].

Omdat in de EOS-studie berekening van de kosten van emissievermindering per kg NO_x nodig was, zijn de kosten van emissiebestrijdingstechnieken voor de helft aan NO_x toegerekend en voor de andere helft aan CO/VOS [26]. De bestrijdingstechnieken werden daarbij zò gekozen dat ze in even grote mate NO_x - als CO/VOS-emissies bestrijden. CO/VOS-emissievermindering is nodig vanwege de fotochemische luchtverontreiniging. Om de mogelijkheden van voertuigensubstitutie en alternatieve brandstoffen voor emissievermindering helemaal tot uitdrukking te laten komen (dus niet alleen voor NO_x , maar ook voor CO/VOS) worden in deze studie de volledige kosten van de emissiebestrijdingstechnieken meegerekend.

REFERENTIES

- [1] Boswinkel, H.H.; D. Gerbers; T. Kram; P. Lako; P.A. Okken; D.N. Tiemersma
Kansen voor nieuwe energietechnieken in Nederland - Globale resultaten van de EOS-studie
ESC-WR-88-22, ESC/ECN, Petten, november 1987
- [2] Boswinkel, H.H.; D. Gerbers; T. Kram; P. Lako; P.A. Okken; D.N. Tiemersma
Uitgangspunten en gegevens voor het EOS-scenario BS, Runs BC, EN en HP tot 2020
ESC/ECN, Petten, oktober 1987
- [3] Okken, P.A.
Netherlands data-base (EOS-MARKAL) SO₂- and NO_x-emission coefficients and abatement techniques
ESC-WR-88-02, ESC/ECN, Petten, February 1988
- [4] Notitie verkeer en milieu
Ministerie VROM, Den Haag, mei 1988
- [5] Mobiliteit, ruimte en milieu
Rom-bulletin
Ministerie VROM, Den Haag, mei 1988
- [6] Peeters, P.M.
Schoon op weg - naar een trendbreuk in het personenverkeer
Vereniging Milieudefensie, Amsterdam, maart 1988
- [7] Schoemaker, Th.J.H.; H.C. van Evert, M.G. van den Heuvel
Trendbreuk-scenario vervoer en verkeer
TU Delft, januari 1988
- [8] Dinkelman, G.
Een wereld van verschil, de normatieve EOS-scenario's
WEMO, RU Leiden
ESC-43, ESC/ECN, Petten, november 1987
- [9] Okken, P.A.
Energie en het broeikas-effect
ESC-40, ESC/ECN, Petten, maart 1987
Energiespectrum 11 (1987) pp. 286-295
- [10] Rail-21
NV Nederlandse Spoorwegen, Utrecht, juni 1988
- [11] Uitgangsgegevens technieken voor wegverkeer, gebruikt in de EOS-scenarioberekeningen
ESC, notitie, 12 april 1988

- [12] Akkeren, R.A.C. van
Aardgas als brandstof voor auto's
Gas 104 (1984) nr. 1, pp. 2-8
- [13] Okken, P.A.
Milieu- en energie-effecten van biogas uit mest en mestover-
schotverwerking
IVEM, RU Groningen, augustus 1985
- [14] Kroon, P.
Energiegebruik en emissies van de transportsector
NEV-52, ESC, Petten, november 1986
- [15] Kegelaar, N.; P.A. Okken
Methanol: schone brandstof voor het wegverkeer?
ESC-WR-88-10, Petten, april 1988
- [16] Alternatieven voor benzine
Duurzame Energie 1988, nr. 2, p. 40
- [17] Hollemans, B.; J. v.d. Weide
Fieldtest methanol/benzine variabele mengsels met 15 auto's
IW/TNO, Delft, juni 1985
- [18] Praktijkproeven met methanol benzinemengsels
REV/PEO, Utrecht, maart 1987
- [19] BMFT
Alternative Energien für den Strassenverkehr; Methanol
TUV Rheinland, Köln, 1983
- [20] Gochnarg, I.; G.L. Groszmann
The biomass role in the Brazilian energy balance
Proc. 3rd EC-Conference Energy from Biomass pp. 1088-1092
Elsevier, England, 1986
- [21] Kram, T.
Beschikbaarheid en prijs van energiedragers
EOS-30, Intern rapport, ESC, Petten 1987
- [22] Le dossier éthanol
AFME, Paris, 1987
- [23] Fuel ethanol and agriculture
US Dept. of Agriculture, Washington, August 1987
- [24] Okken, P.A.
Prijzen en beschikbaarheid van ethanol
EOS-72, Intern rapport, ESC, Petten 1987

- [25] Blok, K.; S. Fockens; J. Bijlsma; P.A. Okken
CO₂-emissiefactoren voor brandstoffen in Nederland
ESC-WR-88-12, ESC/ECN, Petten, mei 1988
- [26] Okken, P.A.
Impacts of environmental constraints on energy technology; the
case of NO_x in the Netherlands. Paper prepared for RAINS/
ETSAP-meeting
ESC-WR-88-13, ESC/ECN, Petten, mei 1988
- [27] van Dongen, L.A.M
Energetische optimalisering van aandrijfsystemen voor elek-
trische voertuigen
Proefschrift, TU Eindhoven, maart 1983
- [28] COST 302: Technical and economic conditions for the use of
electric road vehicles
Ed. by F. Fabre, A. Klose, G. Somer
EEG, DG "Transport" en "Science, Research and Development",
Brussel/Luxemburg, 1987
- [29] Visscher, W.
Ontwikkelingen in galvanische cellen
Chemisch Magazine, juni/juli 1988, pp. 399-400
- [30] IMP-Milieubeheer 1987-1991
Ministeries VROM, L&V, V&W, 's-Gravenhage, september 1986
- [31] IMP-Milieubeheer 1986-1990
Ministeries VROM, L&V, V&W, 's-Gravenhage, september 1985
- [32] Zakboek verkeers- en vervoersstatistieken 1986
CBS, 's-Gravenhage, 1987
- [33] Bedrijfseconomische vergelijking tussen brandstofcelbus,
dieselbus en trolleybus
EBW, Rijswijk, augustus 1987
- [34] Cupédo, A.N.
De trolleybus heeft een concurrent
Auto + Motortechniek 47 (1987) nr. 1 pp. 44-46
- [35] Perspectief van een openbaar stadsvervoer met trolleybussen die
zijn uitgerust met een vliegwielsysteem
EBW, Rijswijk, juni 1982
- [36] COST 303: Technical and economic evaluation of dual-mode
trolleybus national programmes
Ed. by F. Fabre, A. Klose
EEG, DG "Transport" en "Science, Research and Development",
Brussel/Luxemburg, 1987

- [37] Cobbe, R.W.
West Yorkshire Transport Corporation-project. Cit. in [36]
- [38] Vann, L.G.Jr., K.D. Smith, C. Sullivan
Methanol as an alternative fuel
California Energy Commission, Sacramento Co, USA, May 1986
- [39] Bleviss, D.
The new oil crisis and fuel economy technologies: preparing the
light transportation for the 1990's
Quorum Books, 1988, to be published
- [40] Molhoek, A.F.
Energie-effecten van substitutie van conventionele materialen
door kunststoffen
Stageverslag, ESC, Petten, februari 1987
- [41] Harris, G., e.a.
CNG-Market Development Study
New Zealand Energy Research and Development Committee,
Univ. of Auckland, NZ, November 1984
- [42] Singh, M.K., D.O. Moses
State of knowledge of environmental concerns related to natural-
gas-fueled vehicles
Proc. 12th Energy Technology Conference, pp. 786-792
Washington DC, 1985
- [43] Capps, B.J.
CNG's advantages as vehicle fuel spotlighted in West Texas
Pipeline & gas journal, May 1986, pp. 44-45
- [44] Angelis, J.W., H. Birnbreier, H. Haase
Hochenergiebatterie für Elektrostrassenfahrzeuge
ETZ 108 (1987) nr. 14 pp. 658-664
- [45] Gas mix holds the key to alternative fuel
New scientist 11 (1987) nr. 1588 p. 37
- [46] Rele, R.R.J. ter (IW/TNO)
Persoonlijke mededeling, Delft, 6-4-88
- [47] Adams, T.G.
A comparison of engine performance using methanol or dissociated
methanol as the fuel
Proc. XX Fisita Congress, Wien, 6-11 May 1984, pp. 4.151-4.157
- [48] Sakai, T. e.a.
Transient performance development on dissociated methanol fueled
passenger car
Japan Automobile Research Institute report, 1987

- [49] Okken, P.A.
Stikstofoxyden en wegverkeer, emissies met de helft te verlagen
PT-Aktueel (1984) nr. 3 pp. 5-7
- [50] Stürmer, H.
Liquid biofuels for the EC: Techno-economics of Bio-alcohol and
Oil
Proc. 4th EC Conf. Biomass for Energy and Industry, Orléans,
pp. 1279-1283
Elsevier, England, 1987
- [51] Okken, P.A.
Notitie prijs en beschikbaarheid van biogas in de EOS-scenario's
EOS-65, Intern rapport, ESC, Petten, 1987
- [52] Shell Energiescenario's voor Nederland, 1985-2010
Shell Nederland BV, maart 1988
- [53] Wubs, K., R.J.H. Deckers
Strategische PEO-studie naar alternatieve brandstoffen m.b.t.
verbrandingsmotoren
PEO, Utrecht, maart 1988
- [54] Okken, P.A.
Notitie brandstofcellen in de EOS-scenario's
EOS-66, Intern rapport, ESC, Petten, 1987
- [55] Scheele, D.
Energieverbruik en emissies in de sector verkeer en vervoer
ESC-WR-86-10, Petten, juli 1986
- [56] Douma, C. (NOVEM)
Persoonlijke mededeling, Petten, 8-9-88
- [57] Okken, P.A.
Milieu- en energie-effecten van warmtepompen en HR-ketels
Ministerie VROM, Publikatiereeks Lucht nr. 51, mei 1986
- [58] Kreulen, H.P. e.a.
An economic process for the production of a diesel fuel
substitute from edible oil fractions
Proceedings 3rd EC-Conference Energy from Biomass, Venezia,
pp. 1069-1073, Elsevier, England, 1985

Overzicht van verschenen ESC-rapporten

Onderstaande publikaties zijn, voorzover in voorraad, verkrijgbaar bij: Secretariaat ESC

Postbus 1, 1755 ZG PETTEN (tel. 02246-4347)

- ESC- 1 Voorstel gecoördineerd onderzoekprogramma energie-opslag in vliegtuigen
Projectvoorbereidingsgroep "Vliegtuigen"
- ESC- 2 Rookgasontzwaveling*
- ESC- 3 Introductie scenario's zonneboilers
Energetische en economische gevolgen van de introductie van zonneboilers en andere verbeterde warmwaterapparatuur in Nederland
- ESC- 4 Oil substitution in the Netherlands
A case of "negative oil substitution"*
- ESC- 5 Energiebesparing, hoe is het mogelijk?
Een sociaal-psychologisch onderzoek naar de bevordering van energiebesparing door gedragsbeïnvloeding bij gezinshuishoudingen*
- ESC- 5 Energiebesparing, hoe is het mogelijk?
SAM Een samenvatting van rapport ESC-5
- ESC- 6 Huidige en toekomstige stoomketelcapaciteit in Nederland
- ESC- 7 Energiegebruik van industriële sectoren in relatie tot economische karakteristieken peiljaar 1977
- ESC- 8 De lasten en baten van de openbare elektriciteitsvoorziening in Nederland - waarin opgenomen de historische kosten van kernenergie*
- ESC- 9 Kolen als industriële brandstof
- ESC-10 Bestrijding van SO₂- en NO_x-emissie bij steenkoolverbruik
- ESC-11 Kolengestookte ketelinstallaties
- ESC-12 Steenkoolas
- ESC-13 Chemie en Kolen
- ESC-14 Optimale capaciteit van warmtepompsystemen voor kollektieve ruimteverwarming
- ESC-15 De werkgelegenheidseffecten van het Nationaal Isolatie Programma*
- ESC-16 Energiebesparing Gebouwde Omgeving;
Een technische en economische vergelijking van besparingsmogelijkheden in de gebouwde omgeving
- ESC-17 Beschrijving van SELPE, een model van de Nederlandse Energievoorziening* (herziene versie: ESC-WR-85-01)
- ESC-18 Energie uit Maas en Rijn; een systematische analyse
- ESC-19 Stoomketelvervanging in Rijnmond
- ESC-20 Energiebesparing in gezinshuishoudingen: Attitudes, normen en gedragingen, een landelijk onderzoek
- ESC-21 Industrieel proceswarmtegebruik in relatie tot het temperatuurniveau
- ESC-22 Integrale Energiescenario's en Modellen voor Nederland door de Werkgroep Integrale Energie Scenario's
- ESC-23 De energievoorziening in de vier MDE-scenario's gebaseerd op berekeningen met het energiemodel SELPE
- ESC-24 Warmte/kracht koppeling en energiecentra*
- ESC-25 Brandstofverbruikende installaties bij de Nederlandse industrie; Een kwantitatief overzicht

- ESC-26 De beleving van risico's
Een landelijk onderzoek naar veronderstellingen, attitudes, normen en gedragingen met betrekking tot het opwekken van elektriciteit met kolen, uraan en wind
- ESC-27 Kostprijs van enige energietechnieken
- ESC-28 De mogelijkheden van in-situ vergassing van steenkool in Nederland*
- ESC-29 Het EZ-Referentiescenario 1984 - Enige berekeningen met het energiemodel SELPE*
- ESC-30 Optimale strategieën voor de bestrijding van zure regen veroorzakende SO₂- en NO_x-emissies; Gebaseerd op berekeningen met SELPE^x
- ESC-31 Nieuwe energiebronnen in Japan - Opzet en uitvoering van energieonderzoekprogramma's
- ESC-32 Na-isolatie, werkgelegenheid en besparingen in het Noorden des Lands - Analyse en evaluatie*
- ESC-33 Symposiumverslag
"Nutsbedrijven - nieuwe stijl: Meer innovatie?"
- ESC-34 Individuele oordelen over technologische vernieuwingen
Vorstudies t.b.v. het project "Publiek en technologische innovaties"*
- ESC-35 Grootschalige energieopwekking in de industrie
Opties voor stoomproductie 1990 tot 2000
Gevoeligheid van de rentabiliteit
- ESC-36 Investeren in energiekostenbesparing
Een onderzoek naar de leverantie door het Nederlandse bedrijfsleven
- ESC-37 Buurtgerichte voorlichting over energiebesparing
Een evaluatie-onderzoek naar de invloed van sociale netwerken op het voorlichtingsproces*
- ESC-38 Energy consumption for steel production - An example of energy accounting
- ESC-39 De modellering in GAMS van het model SELPE
- ESC-40 Energie en het broeikas-effect
't Kan vriezen, 't kan dooien
- ESC-41 Kleinschalige (Niet-industriële) energieopwekking
Gevoeligheid van de rentabiliteit van warmteproductie-opties*
- ESC-42 Nationale Energie Verkenningen 1987
- ESC-43 Een wereld van verschil, de normatieve EOS-scenario's
- ESC-44 Vermijden of bestrijden?
Emissies en kosten van emissiebeperking van SO₂, NO_x en stof tot 2010, behorend bij de Nationale Energie Verkenningen 1987
- ESC-45 Effecten van lagere brandstofprijzen op de resultaten van de NEV-scenario's
- ESC-46 Industriële WKK en kolenketels op langere termijn bij het nieuwe stimuleringsbeleid
- ESC-47 Economische rentabiliteit windenergiesystemen - Rekenmodel voor de rentabiliteit onder variërende uitgangspunten
- ESC-48 Toekomstige produktiekosten van basislasteenheden
Opgesteld op verzoek van de AER
- ESC-49 SERUM: Een model van de Nederlandse Raffinage-industrie

- ESC-50 Economische en milieu-effecten van elektrische auto's
Studie uitgevoerd in opdracht van de NOVEM
- ESC-51 Energiebesparing bij het verkeer & vervoer 1973-1987 een
evaluatie van overheidsmaatregelen
- ESC-52 Kansen voor alternatieve brandstoffen in het wegverkeer in
Nederland tot 2020

*) Niet meer voorradig, bij bibliotheek ECN beschikbaar