

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling met

Titel: Aardolie : grondstof en brandstof ? Alternatieven als antwoord op peak oil

Richting: 2de masterjaar handelsingenieur - operationeel management en logistiek

Jaar: 2009

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Ik ga akkoord,

VANDEWAERDE, Maarten

Datum: 14.12.2009

Aardolie : grondstof en brandstof ?

Alternatieven als antwoord op peak oil

Maarten Vandewaerde

promotor :
Prof. dr. Jean MANCA

Woord vooraf

Deze masterproef kwam tot stand in het kader van het behalen van de graad van master in de Toegepaste Economische Wetenschappen: Handelsingenieur, met als afstudeerrichting Operationeel Management en Logistiek. Het werk vormt een mooi sluitstuk voor de vijfjarige opleiding aan de Universiteit Hasselt. Mijn eerste dank gaat dat ook uit naar deze instelling en de personeelsleden die me gedurende deze periode vele kansen en een uitstekende ondersteuning hebben geboden.

Verder wil ik uiteraard mijn promotor, prof. dr. Jean Manca, bedanken voor het aanreiken van een fascinerend onderwerp. Het bestuderen van deze belangrijke, actuele en continu in beweging zijnde problematiek was dan ook een uitdaging die ik vaak met plezier volbracht heb. Ook de goede raad, ondersteuning en sturing die hebben bijgedragen tot een goede totstandkoming van deze masterproef heb ik ten zeerste op prijs gesteld.

Hiernaast wil ik graag mijn dank betuigen aan de externe personen die hun medewerking hebben verleend bij het schrijven van dit project. Zonder hen was het resultaat dat hier voor u ligt niet mogelijk geweest. Hierbij denk ik in de eerste plaats aan prof. dr. Dirk Vanderzande, prof. dr. Jozef Put en prof. dr. Patrick De Grootte voor hun sturing en aanbreng van inzichten en nuttige informatie. Daarnaast gaat ook een woord van dank uit naar de vele personen die in de afgelopen maanden via elektronische weg bruikbare informatie en data hebben verstrekt. Natuurlijk wil ik ook Royal DSM N.V., en in het bijzonder dhr. Robert Kirschbaum, bedanken voor hun medewerking aan de gevalstudie.

Laatst, maar niet in het minst, dank ik mijn familie en vriendin voor hun luisterend oor en steun gedurende mijn gehele opleiding en in het bijzonder tijdens het uitwerken van deze masterproef.

Maarten Vandewaerde
Mei, 2009

Samenvatting

Aardolie is een van de belangrijkste grondstoffen op aarde. Het gebruik ervan kent vele toepassingen waarmee iedereen dagelijks geconfronteerd wordt. Meest voor de hand liggend is het gebruik van aardolie als brandstof, bijvoorbeeld in de vorm van diesel, benzine of huisbrandolie. Aardolie is echter ook de basisstof voor een heel arsenaal andere producten zoals asfalt, smeermiddelen en petrochemische afgeleiden.

Dit alomtegenwoordige gebruik van aardolie brengt automatisch een grote afhankelijkheid ten opzichte van de grondstof met zich mee. Deze afhankelijkheid gaat gepaard met twee grote gevaren. Ten eerste komen bij het verbruik van fossiele brandstoffen vervuilende stoffen vrij. Hierbij is vooral CO₂ een grote boosdoener, aangezien is aangetoond dat deze stof bijdraagt tot de opwarming van de aarde. Een tweede probleem dat zich stelt is meer van economische aard en vormt het uitgangspunt van deze masterproef. De voorraad aardolie is namelijk niet onuitputtelijk. In hoofdstuk 2 zal dan ook worden ingegaan op de mate waarin de bevoorrading van aardolie in de toekomst een probleem zal opleveren. Cijfers tonen aan dat de bewezen reserves aan het huidige verbruikstempo nog voor ongeveer veertig jaar kunnen voorzien in de wereldwijde behoefte aan aardolie. De werkelijke economische realiteit is echter nog minder rooskleurig en wordt beter beschreven aan de hand van het begrip 'peak oil'. Dit pieken van de wereldwijde productie van aardolie zal namelijk reeds voor de uitputting van de grondstof tot aanzienlijke problemen leiden. Na verloop van tijd zal de stijgende vraag naar aardolie namelijk niet meer bevredigd kunnen worden door een afnemende productie. Algemeen wordt verwacht dat dit pieken van de aardolieproductie voor 2030 zal optreden en wellicht nog sneller.

Zoals in hoofdstuk 3 wordt aangetoond, zal de wereldwijde (en Belgische) vraag naar energie en aardolie in de toekomst namelijk alleen maar toenemen. Concreet zal de totale vraag naar energie jaarlijks met ongeveer 1,6 procent aangroeien. Dit betekent een stijging van 45 procent in de periode 2005-2030. Deze toename in de vraag zal voornamelijk worden opgevangen door een stijging in het verbruik van fossiele brandstoffen. Steenkool en aardgas kennen hierin de sterkste relatieve stijging, maar ook de vraag naar aardolie neemt substantieel toe. De vloeibare fossiele grondstof zal ook in 2030 de belangrijkste energiebron blijven. Ook in België zal dit het geval zijn. Bovendien behoort het land op het vlak van aardolieverbruik per inwoner wereldwijd tot de koplopers. Hierdoor is het extra kwetsbaar voor de economische gevolgen van het pieken van de aardolieproductie, die in hoofdstuk 3 uitvoerig besproken worden. De resulterende schaarste heeft namelijk rechtstreeks tot gevolg dat de prijs en de prijsvolatiliteit van aardolie zullen stijgen. Via een aantal mechanismen dringen deze gevolgen door tot de belangrijkste macro-economische indicatoren: inflatie, werkloosheid en economische groei. Deze zullen globaal genomen allemaal negatief beïnvloed worden. De verwachte toename in de prijsvolatiliteit versterkt deze negatieve

gevolgen alleen maar aangezien de negatieve impact van een prijsstijging veel sterker doorweegt dan de positieve impact van een prijsdaling.

In hoofdstuk 4 wordt een uitgebreid overzicht gegeven van de verschillende producten en gebruiken waarvoor aardolie ingeschakeld wordt. Hieruit blijkt dat het product in meer dan een dozijn productcategorieën verwerkt wordt. Deze gaan van petroleumgassen, nafta en benzine tot smeervetten, asfalt en cokes. Daarnaast wordt aardolie ook gebruikt in de aanmaak van een groot aantal petrochemicaliën, waaruit men onder andere diverse plastics, synthetisch rubber, solventen en synthetische vezels kan produceren. In het algemeen kan men stellen dat transportactiviteiten verreweg het grootste aandeel (60 %) hebben in het finale verbruik van aardolieproducten. De stijgende trend die op dit vlak te ontwaren is zal zich ook in de toekomst blijven verder zetten. Het gebruik ervan als energiebron in de industrie en andere sectoren (landbouw, commerciële- en overheidsdiensten en residentieel verbruik) kent daarentegen een afnemend belang. Vaak treedt hier substitutie door andere energiebronnen, zoals aardgas, op. Het niet-energiegebruik, dat ongeveer één zesde van het totale verbruik vertegenwoordigt, neemt wel toe. Hieronder behoren producten zoals smeeroliën en -vetten, asfalt, cokes en petrochemicaliën. Men schat dat ongeveer vier procent van de aardolie als voedingsbron voor de petrochemische sector gebruikt wordt.

Vanwege de diversiteit aan toepassingen gebaseerd op het product aardolie bestaat er een groot platform waarop mogelijke alternatieven voor aardolie kunnen ontwikkeld worden. De meest belovende en commercieel mature technologieën worden in hoofdstuk 5 gedetailleerd besproken. Hierbij valt op dat er vooral voor het stationaire gebruik van aardolie, zoals elektriciteit- en warmteopwekking, mogelijkheden tot vervanging bestaan. De meeste (en best ontwikkelde) alternatieve energiebronnen zijn namelijk toegespitst op dit soort stationaire toepassingen. Enkele auteurs halen dan ook aan dat het pieken van de aardolieproductie geen energiecrisis zal veroorzaken. Zij spreken van een wereldwijd probleem op het vlak van vloeibare (transport)brandstoffen. Transport is namelijk verantwoordelijk voor veruit het grootste verbruik van aardolie en er zijn bovendien amper valabele alternatieven in dit domein voorhanden die een drastische verlaging van de aardolieafhankelijkheid zouden kunnen bewerkstelligen. Bovendien is de huidige transportinfrastructuur quasi volledig afgestemd op aardolieafgeleiden. Vanwege hoge vervangingskosten bieden alternatieven die compatibel zijn met conventionele voertuigen en installaties dan ook op korte termijn de interessantste vooruitzichten. Hiertoe behoren biobrandstoffen en vloeibare brandstoffen uit oliezanden en extra zware aardolie maar ook synthetische aardolie die via bepaalde technieken (GTL, CTL, BTL) uit aardgas, steenkool en biomassa kan geproduceerd worden. Tegen 2030 zouden zij naar verwachting ongeveer negen procent van het totale aardolieverbruik vormen, met vooral een grote rol voor de eerste groep alternatieve transportbrandstoffen. De implementatie van deze alternatieven vormt echter geen zaligmakende oplossing en zal het optreden van het pieken van de aardolieproductie enkel maar kunnen uitstellen en de gevolgen ervan enigszins kunnen verzachten. Men pleit er dan ook voor dat

deze technologieën een soort overgangsfase zouden vormen naar een werkelijke energierevolutie, bijvoorbeeld gebaseerd op waterstof. De problemen op het vlak van productie, opslag en toelevering van deze energiedrager zorgen er echter voor dat een grootschalige invoering ervan vooralsnog toekomstmuziek is. Verdergaand onderzoek en investeringen in de verschillende alternatieven is dan ook noodzakelijk om de wereldwijde energievoorziening in de toekomst niet in gevaar te brengen.

In hoofdstuk 6 wordt dan ook nagegaan in welke technologieën geïnvesteerd wordt en door wie. Bijzondere aandacht gaat hierbij uit naar de inspanningen van aardoliemaatschappijen en chemische bedrijven. Uit onderzoek blijkt duidelijk dat de grootste bedragen geïnvesteerd worden in vernieuwende koolwaterstoffen. Dit zijn de technologieën die compatibel zijn met de huidige infrastructuur zoals vloeibare brandstoffen uit olieschalie, oliezanden, extra zware aardolie en technieken zoals gas-to-liquids en coal-to-liquids. Vernieuwingen in het eindgebruik van energie zoals cogeneratietechnieken voor warmte en elektriciteit, brandstofcellen en geavanceerde voertuigtechnologieën (o.a. hybride wagens) komen op de tweede plaats. De niet-koolwaterstoffen zoals kern-, wind-, zonne- en geothermische energie maar ook biomassa kennen relatief het minst investeringen. Ook op het vlak van wie de investeringen uitvoert zijn grote verschillen op te merken. De overgrote meerderheid van de fondsen wordt door de aardolie- en gasindustrie geïnvesteerd. Ook andere private industrieën investeren vrij grote bedragen in alternatieve energiebronnen. Het door de overheid geïnvesteerde bedrag blijkt in verhouding vrij beperkt te zijn, al dient hun stimulerende voortrekkersrol niet onderschat te worden. Er bestaat een duidelijke overlapping tussen de grootste investeerder en de technologie waarin het meest geïnvesteerd wordt. De aardolie en gasindustrie spendeert namelijk bijna hun volledig budget aan vernieuwende koolwaterstoffen. Dit is logisch aangezien de productie van koolwaterstoffen en de omvorming ervan tot hoogwaardige producten tot hun kerncompetenties behoort. Ondanks het beeld dat deze maatschappijen graag naar buiten willen brengen, blijken strategische stappen richting een werkelijke energierevolutie vooralsnog dus nog niet aan de orde voor hen.

De masterproef kent in hoofdstuk 6 ook een praktische insteek aan de hand van een gevalstudie bij Royal DSM N.V. Hierbij zal worden nagegaan welke stappen door het bedrijf, als vertegenwoordiger van de chemische sector, worden genomen in het ontwikkelen van aardoliealternatieven met de problematiek van piekolie in het achterhoofd. Bijzondere aandacht wordt hierbij besteed aan witte (of industriële) biotechnologie, hetgeen door het bedrijf als één van de strategische opkomende groeimarkten wordt beschouwd. Binnen deze tak zal de gevalstudie dan vooral dieper ingaan op biogebaseerde chemicaliën en materialen.

Het onderzoek zal in hoofdstuk zeven worden afgesloten door een opsomming van de belangrijkste conclusies die in deze masterproef naar voren zijn gekomen. Hieruit worden vervolgens ook een aantal aanbevelingen naar de (Belgische) overheid toe geformuleerd.

Inhoudsopgave

Woord vooraf

Samenvatting

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1: Inleiding en probleemstelling	1
1.1 Probleemstelling	1
1.2 Onderzoeksdoel.....	2
1.3 Centrale onderzoeksvraag	3
1.4 Onderzoeksstrategie	3
Hoofdstuk 2: Aardolie	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Vorming van aardolie	7
2.2.1 Organisch ontstaan	7
2.2.2 Anorganisch ontstaan.....	9
2.3 Reserves	10
2.4 Peak oil	13
Hoofdstuk 3: Aardolie en de economie	17
3.1 Energie en de wereld	17
3.2 Energiesituatie in België	18
3.3 Economische impact van aardolie	21
Hoofdstuk 4: Aardolieproducten	28
4.1 Chemische samenstelling aardolie	28
4.2 Raffinageprocessen	29
4.2.1 Scheidingsprocessen	30
4.2.2 Conversieprocessen	31
4.2.3 Afwerkingsprocessen	32

4.3 Producten afgeleid van aardolie	32
4.3.1 Petroleumgassen	32
4.3.2 Nafta	33
4.3.3 Benzine	34
4.3.4 Straalvliegtuigbrandstof	36
4.3.5 Kerosine	37
4.3.6 Stookoliën	37
4.3.7 Diesel	38
4.3.8 Smeeroliën	39
4.3.9 Andere afgeleide oliën	40
4.3.10 Petroleumwas	41
4.3.11 Smeervetten	41
4.3.12 Asfalt	42
4.3.13 Cokes	42
4.3.14 Petrochemicaliën	43
4.3.14.1 Inleiding	43
4.3.14.2 Chemicaliën uit olefinen	44
Ethyleen	45
Propyleen	46
Butadieen	48
Butenen	48
Isobutyleen	48
4.3.14.3 Chemicaliën uit aromaten	48
Benzeen	49
Tolueen	50
Xyleen	50
4.3.14.4 Chemicaliën uit methanol	50
4.3.14.5 Chemicaliën uit anorganische componenten	50
4.4 Conclusie	51
Hoofdstuk 5: Alternatieven voor aardolie	55
5.1 Waterkracht	55

5.2 Geothermische energie	57
5.3 Windenergie	59
5.4 Zonne-energie	60
5.4.1 Zonnewarmte	61
5.4.2 Fotovoltaïsche zonne-energie	62
5.5 Waterstof	63
5.6 Kernenergie	66
5.7 Aardgas	67
5.8 Steenkool	69
5.9 Onconventionele aardolie	72
5.9.1 Olieschalie	72
5.9.2 Extra zware aardolie en oliezanen	73
5.10 Biomassa	75
5.11 Conclusie	78
Hoofdstuk 6: Implementatie van de alternatieven	82
6.1 Implementatie van de alternatieven in het verleden	82
6.2 Huidige implementatie van de alternatieven	83
6.3 Gevalstudie: DSM	87
6.3.1 Beschrijving bedrijf	87
6.3.2 Witte biotechnologie	90
6.3.2.1 Inleiding	90
6.3.2.2 Witte biotechnologie binnen DSM	94
Toepassing: barnsteen-zuur	96
Hoofdstuk 7: Conclusies en aanbevelingen	99
7.1 Conclusies	106
7.2 Aanbevelingen	106

Lijst van afkortingen

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van geraadpleegde werken

Hoofdstuk 1: Inleiding en probleemstelling

1.1 Probleemstelling

Aardolie is één van de belangrijkste grondstoffen op aarde. Het gebruik ervan kent vele toepassingen waarmee iedereen dagelijks geconfronteerd wordt. Meest voor de hand liggend is het gebruik van aardolie als brandstof. Onder deze categorie vallen ondermeer afgeleide producten zoals diesel, benzine en huisbrandolie. Aardolie is echter ook de basisstof voor een heel arsenaal andere producten. Afhankelijk van de processen die men gebruikt in de raffinaderij kan men uit de ruwe grondstof namelijk onder andere asfalt, smeermiddelen en petroleumwassen produceren. Hiernaast wordt aardolie als basisgrondstof gebruikt in de petrochemie. Deze sector, die in België zo belangrijk is, vervaardigt hieruit een brede waaier aan producten zoals plastics, verven, solventen, synthetisch rubber en meststoffen (Guthrie, 1960).

Dit wijdverspreid gebruik van aardolie brengt vanzelfsprekend een grote afhankelijkheid ten opzichte van de grondstof met zich mee. Deze afhankelijkheid gaat gepaard met twee grote gevaren. Ten eerste komen bij het verbruik van fossiele brandstoffen vervuilende stoffen vrij. Hierbij is vooral CO₂ een grote boosdoener, aangezien is aangetoond dat deze stof bijdraagt tot de opwarming van de aarde (Hanjalic, Van de Krol, & Lekic, 2008). Een tweede probleem dat zich stelt is meer van economische aard. De voorraad aardolie is niet onuitputtelijk. De hoeveelheid bewezen reserves op het einde van 2007 wordt geschat op 1237,9 miljard vaten. De consumptie bedroeg in datzelfde jaar maar liefst 85,22 miljoen vaten per dag (BP, 2008). Een korte berekening toont aan dat de bewezen reserves voor ongeveer veertig jaar voldoende zijn. Hierbij wordt de verwachte stijging van de consumptie zelfs nog niet in acht genomen (ook van eventuele nieuwe ontdekkingen van aardoliereservoirs wordt evenwel abstractie gedaan).

Deze periode van veertig jaar lijkt de mensheid een redelijk ruime periode te geven waarin op zoek kan worden gegaan naar alternatieven. Dit is echter misleidend aangezien de laatste reserves aardolie nooit geproduceerd zullen worden vanwege de extreem hoge prijs die hieraan verbonden zal zijn. Om de ware economische impact van een stijgende consumptie ten opzichte van een dalende voorraad in te schatten is de term piekolie ('peak oil') dan ook een betere indicator. De geofysicus Hubbert, de bedenker van deze term en de theorie die erachter zit, stelt dat de productie van ruwe aardolie op een bepaald moment zijn maximum zal bereiken en daarna enkel maar zal dalen (Hirsch, Bezdek & Wendling, 2005). Het model dat hij uitwerkte voor de productie in de Verenigde Staten bleek vrij accuraat in het voorspellen van de piek. Algemeen wordt aangenomen dat deze theorie kan doorgetrokken worden naar de productie op wereldvlak. De

meningen van analisten over het tijdstip van het optreden van deze piek in de aardolieproductie zijn echter verdeeld. Sommigen stellen dat de wereld dit stadium al voorbij is, terwijl anderen dit voorzien in de nabije toekomst. In het algemeen kan men stellen dat de grote meerderheid van de analisten ervan uitgaat dat dit een feit zal zijn binnen de komende 15 tot 20 jaar (National Energy Technology Laboratory, 2007).

De oliepiek zal, samen met een verhoogde vraag, onlosmakelijk leiden tot een stijging van de prijs van ruwe aardolie. Aangezien onze wereldeconomie zoals eerder aangegeven voor een groot aantal activiteiten afhankelijk is van deze aardolie, brengt een prijsstijging substantiële problemen met zich mee. De traditionele olieverwerkende bedrijven, zoals raffinaderijen en petrochemische bedrijven, zullen het eerst met deze problemen te maken krijgen (Leder & Shapiro, 2008). Vervolgens zullen ze via de prijzen van de afgeleide producten doorsijpelen naar de rest van de economie. Hier tasten ze de winstgevendheid aan van quasi elke onderneming door verhoogde verwarmings-, transport- en loonkosten (via de koppeling aan de inflatie) en prijsstijgingen van andere producten. Door de grote afhankelijkheid van aardolie brengt een stijging van de prijs gevolgen met zich mee die de gehele economie treffen (Bezdek et al., 2005).

Het is vanuit dit standpunt dan ook interessant om even stil te staan bij de huidige maatregelen die worden getroffen om deze effecten zo veel mogelijk te beperken. Men kan zich hierbij afvragen op welke manier producenten en grote gebruikers van aardolie omgaan met het vooruitzicht van een dalende productie van aardolie en de hiermee gepaard gaande prijsstijgingen. Met andere woorden welke alternatieven voor aardolie als grondstof en brandstof worden ontwikkeld door de verschillende betrokken spelers?

1.2 Onderzoeksdoel

Het doel van deze masterproef is een beeld te schetsen van de huidige ontwikkelingen op het gebied van alternatieven voor aardolie die dienen als antwoord op de (economische) gevolgen verbonden aan de uitputbaarheid van de grondstof. Hiertoe zal eerst een inzicht worden gegeven in de toekomstige aardoliebevoorradingssituatie en de verwachte impact hiervan op de economie. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de verscheidenheid aan toepassingen waarvoor aardolie gebruikt kan worden. Voor deze applicaties zal vervolgens onderzocht worden welke mogelijke technologieën de wereld minder afhankelijk van de grondstof kunnen maken. Ten slotte wordt nagegaan in welke mate de alternatieven door betrokken spelers worden onderzocht en ontwikkeld.

1.3 Centrale onderzoeksvraag

Uit de algemene probleemstelling kan de onderstaande centrale onderzoeksvraag worden geformuleerd:

In welke mate worden alternatieven voor aardolie als brandstof en als grondstof door de verschillende betrokken partijen ontwikkeld?

Om een correct en volledig antwoord op deze vraag te kunnen geven is het nodig dat ze verder wordt uitgesplitst in een aantal deelvragen. De antwoorden op deze deelvragen zullen elk hun bijdrage leveren in het creëren van het totaalbeeld dat in dit onderzoek beoogd wordt. Hiertoe zullen onderstaande vragen als leidraad dienen:

- In welke mate zal de bevoorrading van aardolie in de toekomst een probleem vormen?
- In welke mate zal deze schaarste invloed hebben op de economie?
- Welke verschillende producten kunnen uit aardolie geproduceerd worden en in welke hoeveelheden gebeurt dit?
- Welke alternatieven voor aardolie zijn theoretisch mogelijk?
- In welke mate worden deze alternatieven reeds commercieel toegepast?
- Zijn oliemaatschappijen en petrochemische bedrijven geneigd om alternatieven voor aardolie te ontwikkelen?
- Welk soort bedrijven ziet kansen in het ontwikkelen van alternatieven voor aardolie?
- Wat betekent deze problematiek voor chemiebedrijven in de Benelux?

1.4 Onderzoeksstrategie

Het onderzoek in het kader van deze masterproef is grotendeels uitgevoerd aan de hand van een

uitgebreide literatuurstudie. Rond de beschreven onderwerpen bestaat vaak reeds zeer diepgaande gespecialiseerde vakliteratuur die zich sterk leent tot verwerking in het onderzoek. Vanwege een aanhoudende stijging van de aardolieprijzen tot juli 2008 en een vergroot maatschappelijk besef rond de schadelijke effecten van fossiele brandstoffen is het bovendien een vakgebied waarin recentelijk veel onderzoek is gedaan. De gebruikte wetenschappelijke literatuur is dan ook meestal up-to-date en weerspiegelt recente academische inzichten in de onderzochte problematiek. Bovendien bestaan er een aantal internationale organisaties die maandelijks, of minstens jaarlijks, statistische gegevens rond energie en aardolie publiceren waardoor ook het gebruikte cijfermateriaal een zeer goede weerspiegeling geeft van de huidige realiteit. Uiteraard dient de toekomstige lezer wel rekening te houden met het grote veranderingstempo waarmee de sector en dus ook dit onderwerp te maken heeft, waardoor huidige bevindingen binnen afzienbare tijd misschien niet meer volledige de waarheid weerspiegelen.

Naast de literatuurstudie is er binnen deze masterproef ook onderzoek uitgevoerd aan de hand van een gevalstudie. Hierin wordt nagegaan hoe een chemisch bedrijf, in casu Royal DSM NV, actief is op het vlak van de ontwikkeling van aardoliealternatieven (met de problematiek van piekolie in het achterhoofd). Bijzondere aandacht gaat hierbij naar de verwezenlijkingen op het gebied van biogebaseerde chemicaliën en materialen.

Ten slotte zijn er in de loop van het onderzoeksproces ook nog een aantal andere acties ondernomen die hebben bijgedragen tot een succesvolle afronding van deze masterproef. Vooral een aantal persoonlijke en elektronische contacten zijn van onschatbare waarde geweest. Allereerst heeft het aanschrijven van enkele instanties, zoals het IEA en de APPE, geleid tot het bekomen van uiterst recent en compleet cijfermateriaal (normaal enkel te verkrijgen na het betalen van een aanzienlijk geldbedrag) en andere interessante naslagwerken. Deze documenten vormden vaak kritische steunpilaren waarop de rest van het onderzoek is voortgebouwd. Ook gesprekken met academische experts aan de Universiteit Hasselt hebben een cruciale rol gespeeld in de totstandkoming van deze masterproef. Zo leidde het gesprek met prof. dr. Patrick De Groot, vanuit zijn kennis als docent geo-economie, tot de benodigde inzichten rond de samenstelling, vorming en resterende voorraden van aardolie. Prof. dr. Dirk Vanderzande gaf daarnaast vanuit zijn eigen aanvoelen en ervaring een interessante invalshoek voor het onderzoek aan, waarrond de gehele masterproef zich ook uiteindelijk heeft ontwikkeld. Het gesprek met Prof. dr. Jos Put, ten slotte, leidde tot een eerste inzicht in de activiteiten van Royal DSM NV inzake alternatieven voor aardolie. Bovendien was hij een grote hulp bij het bepalen van de richting waarin de gevalstudie kon uitgaan en hielp hij om contact te leggen met de bevoegde personen binnen het bedrijf. Deze personen, en in het bijzonder dhr. Robert Kirschbaum, kunnen binnen deze paragraaf als laatste gecontacteerde personen worden aangehaald die in belangrijke mate hebben bijgedragen tot het succesvol volbrengen van het onderzoek.

Hoofdstuk 2: Aardolie

Dit inleidend hoofdstuk heeft als doel een kader te schetsen rond de problematiek die in deze masterproef behandeld zal worden. Hiertoe zal eerst een korte beschrijving en geschiedenis van het product aardolie gegeven worden. Vervolgens wordt dieper ingegaan op de vorming van aardolie. Een inzicht in dit ontstaan maakt het mogelijk om de problemen rond de uitputbaarheid van de reserves van aardolie beter te plaatsen. De grootte en verwachte levensduur van de resterende reserves vormen dan ook een belangrijk onderdeel van dit hoofdstuk. Als laatste komt het begrip piekolie (peak oil) aan bod. Dit pieken van de aardolieproductie blijkt een betere indicator van de economische gevolgen verbonden aan het niet-hernieuwbare karakter van aardolie te zijn en zal daarom uitgebreid behandeld worden.

2.1 Inleiding

Aardolie wordt door de mens reeds millennia gebruikt. Oude culturen gebruikten de grondstof, vanwege zijn kleverigheid, om dingen bij elkaar te houden. Ook omwille van zijn waterafstotende eigenschappen was het product in trek (American Petroleum Institute, 1998). Zo gebruikten de Sumeriërs aardolie om mozaïeken in muren en vloeren te plaatsen en wendden de Mesopotamiërs het aan om verbindingen in houten boten te verzegelen. De aardolie die zij hiervoor gebruikten was na de vorming ervan naar de oppervlakte doorgesijpeld en kon daarom gemakkelijk ontgonnen worden.

Ook in de constructie werd aardolie vanwege deze eigenschappen gebruikt. Hierbij werd een viskeuze (stroperige) vorm van aardolie, bitumen genaamd, toegevoegd aan cement. Deze methode werd onder andere gebruikt bij de bouw van de Chinese Muur en enkele oude dammen op de Eufraat (Idem & Simanzhenkov, 2003). Ook in de bijbel komen vele vermeldingen van het gebruik van aardolie voor, onder andere bij de bouw van de Toren van Babel. Verder kende aardolie in de oude beschavingen een belangrijke toepassing op militair vlak. Gedurende meer dan tweeduizend jaar was het een belangrijke bron van militaire kracht en diende het als een soort napalm, ook wel 'Grieks vuur' genoemd (Speight, 2006).

Doorheen de geschiedenis kende aardolie nog een heel aantal andere toepassingen. Zo werd het bijvoorbeeld gebruikt bij de ontwikkeling van de eerste waterdichte regenjas in 1823. De basis van de moderne petroleumindustrie werd echter pas gelegd in 1859 met de ontdekking en commercialisering van petroleum in Oil Creek, Pennsylvania. In die tijd werd walvisolie gebruikt als brandstof in olielampen. De jarenlange jacht op deze dieren had hen echter schaars gemaakt en

hiermee ook de prijs van walvisolie fel opgedreven (Pees, 2004b). De uitvinding van de kerosinelamp in 1854 leidde dan ook tot economische opportuniteiten en hiermee ook tot de vorming van de eerste Amerikaanse oliemaatschappij, de Pennsylvania Rock Oil Company (American Petroleum Institute, 1998). Zij geloofden dat het mogelijk was om naar aardolie onder het aardoppervlak te boren, op vergelijkbare wijze als dat door waterputten voor water werd gedaan. Het bedrijf stelde Edwin L. Drake aan om deze klus te klaren. Vanwege de vele doorsijpelingen van aardolie in de buurt werd Oil Creek, nabij Titusville in Pennsylvania, als locatie gekozen. Na vele problemen en meer dan 2 jaar boren, ontdekte Drake olie op 27 augustus 1859. Deze dag is dan ook de geschiedenis ingegaan als de geboortedag van de moderne petroleumindustrie (Fanchi, 2004).

In minder dan twee jaar na de ontdekking van Drake waren er in Pennsylvania 75 oliebronnen operationeel, die samen meer dan 450 000 vaten per jaar produceerden. Verder werden er verschillende raffinaderijen opgestart die de ruwe olie omvormden tot kerosine voor lampen en smeerolie voor machines. De introductie van de elektrische lamp in 1882 zorgde wel voor een daling in de vraag naar kerosine en dus ook naar aardolie, maar deze was maar van korte duur. De uitvinding van de benzine- en dieselmotor in respectievelijk 1885 en 1892 zorgde namelijk voor een ommekeer. In de snelgroeiende auto-industrie werd aardolie gebruikt als smeermiddel en brandstof. Ook op een ander vlak zorgde aardolie voor een revolutie in de industrie. In 1903 maakten de gebroeders Wright er gebruik van als aandrijvingsmiddel voor hun eerste vlucht. Sindsdien is de toepassing ervan in de luchtvaart niet meer weg te denken (Fagan, 1991).

Ook in de chemische industrie is de interesse voor aardolie sinds de commerciële ontdekking ervan sterk toegenomen. Wetenschappers ontwikkelden technieken waarmee uit aardolie synthetische componenten, zogenaamde petrochemicaliën, konden gewonnen worden. Zo konden onder andere kunstmeststoffen en pesticiden ontworpen worden voor gebruik in de landbouw en ook in de farmaceutische industrie ontwikkelde men hieruit diverse toepassingen (American Petroleum Institute, 1998).

Het belang van aardolie in de wereldeconomie kan amper overschat worden. De grondstof is alomtegenwoordig. Dit is zeker voor België, en in het bijzonder Vlaanderen, het geval. Sectoren die zeer afhankelijk zijn van aardolie zoals de petrochemische-, farmaceutische- en transportsector hebben in deze contreien namelijk een groot economisch belang. Zo vormt de petrochemische industrie in Antwerpen de tweede grootste cluster van dergelijke bedrijven ter wereld en heeft België vanwege zijn centrale ligging in Europa een belangrijke rol als doorvoerland. (Belgische Petroleum Federatie, 2007b) Ook de particulier krijgt dagelijks te maken met de verschillende aardolieproducten. Deze worden namelijk gebruikt in het persoonlijk vervoer, ontelbare kunststofapplicaties, de bemesting van planten, het smeren van scharnieren en nog vele andere toepassingen.

2.2 Vorming van aardolie

In de wetenschappelijke literatuur bestaan er twee theorieën die het ontstaan van aardolie verklaren. In het algemeen wordt echter aangenomen dat de theorie van de organische vorming het meest valabel is voor het overgrote deel van de aardolie (Balaban & Tsatskin, 2008). Aan de anorganische theorie wordt door petroleumgeologen weinig commerciële waarde gehecht, hoewel niet wordt uitgesloten dat kleine hoeveelheden van de grondstof op deze manier gevormd zijn. (Doeglas, et al., 1973).

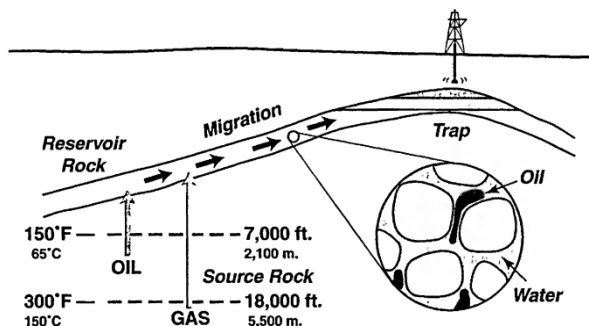
2.2.1 Organisch ontstaan

Deze theorie stelt dat aardolie wordt gevormd door een miljoenen jaren durend omzettingsproces van resten van afgestorven dieren en planten. De organische materie wordt via rivieren afgevoerd naar meren, zeeën en oceanen. Hier bezinken ze, samen met de afgestorven planten en dieren die daar hun habitat hadden, naar de bodem (Thompson & Turk, 2004). Een voorwaarde voor de vorming van aardolie is dat dit bezinken gebeurt in water waar het zuurstofniveau laag is. Hierdoor zullen de afgestorven planten en dieren enkel in de bovenste lagen verteerd worden door bacteriën. In de onderste, zuurstofarme lagen kunnen deze bacteriën niet gedijen waardoor het gedeeltelijk afgebroken organisch materiaal verder niet wordt aangetast. De overgebleven organische stof zinkt dan samen met andere sedimenten naar de bodem (Doeglas, et al., 1973).

Dit proces blijft continu doorgaan, waardoor er zich hierop steeds nieuwe lagen sediment opbouwen. Naarmate de lagen zich blijven opstapelen, treden er veranderingen in dit sediment op. Door het gewicht van de bovenste lagen neemt de druk op het materiaal toe. Ook neemt de temperatuur van de materie toe ten gevolge van een toenemende diepte in de aarde. Hierdoor ontstaat er een geleidelijke omzetting van het sediment tot een hard gesteente, het moedergesteente. Tegelijkertijd treden er door deze twee processen chemische reacties op die de grote, complexe organische moleculen afkomstig van de dieren- en plantenresten omvormen tot simpelere en kleinere koolwaterstofmoleculen (Doeglas, et al., 1973). Hoe langer dit proces duurt en hoe dieper de materie begraven wordt, hoe kleiner de resulterende koolwaterstofmoleculen worden. Vanaf een bepaalde temperatuur en diepte zijn deze moleculen zodanig afgebroken dat er aardolie gevormd wordt. Indien dit proces verder gaat, zullen deze moleculen nog verder afbreken waardoor er hierna aardgas ontstaat. Nog hogere temperaturen zullen er toe leiden dat de koolwaterstofmoleculen vernietigd worden. Deze temperatuurbandbreedte waarin aardolie gevormd kan worden wordt ook wel het 'oil window' genoemd. Afhankelijk van de hoeveelheid en het type organische stof wordt algemeen als vuistregel genomen dat aardolie zal gevormd worden bij temperaturen tussen 65 en 150 graden Celsius. Dit komt overeen met een diepte van ongeveer 2130 tot 5500 meter (Hyne, 2001).

Aardolie die gevormd wordt in het sedimentair gesteente is niet ontginbaar vanwege de ondoordringbaarheid van deze lagen. De olie zal hieruit echter op een natuurlijke wijze migreren naar andere lagen. In dit proces kan men twee migratiefasen onderscheiden (Speight, 2006). Tijdens de primaire migratie zal de gevormde aardolie door de druk van de opeenstapeling van de sedimentenlagen uit het moedergesteente geperst worden. Ondanks dat het gesteente weinig doorlaatbaar is zal dit toch mogelijk zijn omdat het grootste deel van het aanwezige water al in een eerdere fase, toen de aardolie nog niet gevormd was, uitgeperst is geweest. Hierdoor krijgt de gevormde olie meer ruimte en wordt de uitstoting vergemakkelijkt. De vloeistof zal zich hierna naar een aangelegen reservoirgesteente verplaatsen. Een dergelijk gesteente kan dienen als reservoirgesteente als het zowel voldoende poreus als permeabel is. Dit wil met andere woorden zeggen dat de poriën zowel met elkaar verbonden als groot genoeg moeten zijn. Alleen dan zal er een stroming van water, olie en gas doorheen het gesteente kunnen optreden (Doeglas, et al., 1973).

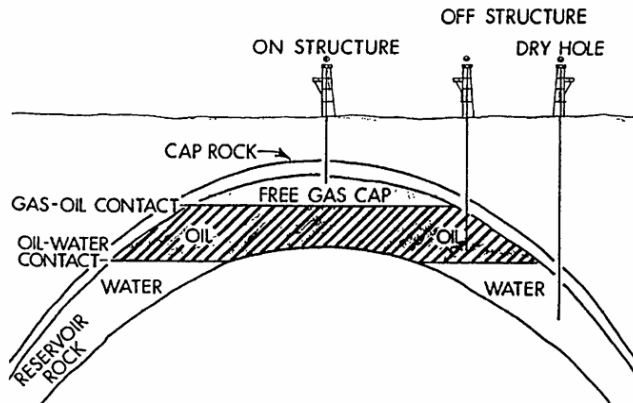
Hierna zal er een secundaire migratiefase optreden. Tijdens deze fase zal de ruwe olie, samen met het eventueel gevormde aardgas, door de poriën van het reservoirgesteente richting het oppervlak van de aarde migreren. Dit is mogelijk vanwege de lagere dichtheid van olie en gas ten opzichte van water en gesteente (Thompson & Turk, 2004). De stoffen leggen hun weg af volgens het pad van de minste weerstand, totdat ze op een ondoordringbare laag stoten (Balaban & Tsatskin, 2008). Dit wordt ook wel een 'oil trap' genoemd. De olie kan zowel verticaal als horizontaal een zeer grote afstand afleggen vooraleer een dergelijke val wordt bereikt en het niet meer verder kan. Een extreem voorbeeld hiervan is het Willistonbassin in Montana. Hier legde de aardolie een horizontale afstand af van maar liefst 320 kilometer (Hyne, 2001). Het volledige zonet besproken proces wordt door Hyne (2001) op figuur 1.1 op een overzichtelijke wijze weergegeven.



Figuur 2.1: Het vormingsproces van aardolie (Hyne, 2001, p. xxxv)

De verschillende stoffen zullen zich vervolgens onder deze oil trap schikken volgens hun dichtheid. Het gas, dat het lichtst is, zal zich net onder deze barrière nestelen. Hieronder, in het midden, zal het aardoliereservoir terug te vinden zijn. Het aanwezige water zal ten slotte naar de bodem

zakken (Hyne, 2001). Om de aardolie te ontginnen dienen oliemaatschappijen nu een gat door de bovenste lagen van de aarde te boren totdat ze het aardoliereservoir bereiken. Op figuur 2.2 wordt de structuur van een aardoliereservoir weergegeven.



Figuur 2.2: De opbouw van een aardoliereservoir (Hyne, 2001, p. 155)

Niet alle aardolie zal op zijn weg naar boven door een ondoordringbaar gesteente gevangen worden. Verder kan het ook voorkomen dat door geologische activiteit het aardoliereservoir vernietigd wordt. Deze oorzaken zorgen ervoor dat een aanzienlijk gedeelte van de gevormde aardolie gewoon doorsijpelt naar de oppervlakte van de aarde en dus (voorlopig) verloren gaat voor ontginning. De oliezanden in Canada zijn een belangrijk voorbeeld hiervan (Thompson & Turk, 2004).

2.2.2 Anorganisch ontstaan

Aanhangers van deze theorie geloven dat aardolie gevormd wordt door spontane, niet-biologische processen diep binnen de mantel van de aarde (Balaban & Tsatskin, 2008). Hier vormen dus anorganische stoffen de basiscomponenten van de ruwe aardolie. Het idee achter de zogenaamde abiogenische theorie is dat grote hoeveelheden koolstof op natuurlijke wijze voorkomen in de aarde, waarvan sommige in de vorm van koolwaterstoffen (Speight, 2006). Vooral de rol van methaan, dat overvloedig voorkomt in de aarde, wordt hierbij belangrijk geacht. Onderzoeken en experimentele studies tonen echter aan dat n-alkanen, belangrijke componenten van aardolie, niet spontaan gevormd worden uit methaan onder de druk die normaal gezien voorkomt in sedimentaire bekkens. De abiogenische theorie suggereert dan ook een veel diepere vorming, tot op meer dan 200 kilometer diepte (Speight, 2006). Omdat de gevormde koolwaterstoffen lichter zijn dan de waterachtige poriënvloeistof van de gesteentes migreren zij vervolgens naar het oppervlak van de aarde toe. Tijdens deze opwaartse migratie komt de aardolie in contact met thermofiele bacteriën die op grote diepte kunnen gedijen. Hiermee verklaren voorstanders van een anorganisch ontstaan het voorkomen van zogenaamde biomarkers in de aardolie. Deze

biomarkers bewijzen dat er biologische componenten aanwezig zijn in de grondstof. De migratie gaat vervolgens door, op net dezelfde manier als bij het organisch ontstaan, tot een ondoordringbare bovenlaag is bereikt en de aardolie wordt gevangen in een geologische val (Fanchi, 2004).

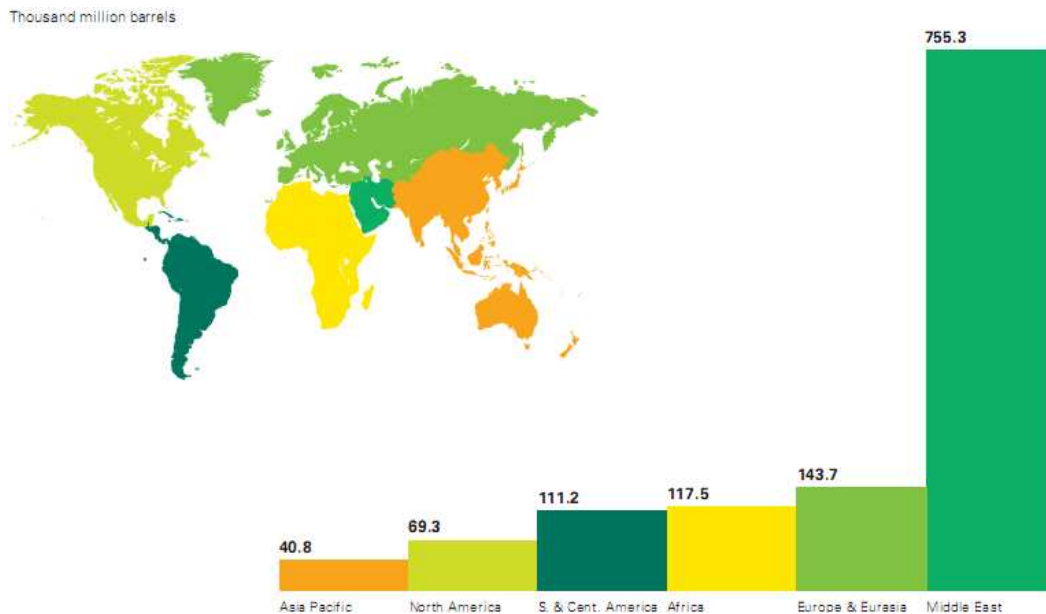
Als deze theorie correct blijkt te zijn, dan zouden de huidige schattingen van de aardoliereserves ruim onderschat kunnen zijn (Balaban & Tsatskin, 2008). Deze gaan er namelijk vanuit dat aardolie een uitputbare grondstof is. De abiogenische theorie stelt echter dat deze processen continu doorgaan in de mantel van de aarde en er in feite dus een quasi onbeperkte voorraad van de grondstof is die telkens wordt aangevuld (Fanchi, 2004). Een anorganisch ontstaan van aardolie kende vooral een grote populariteit in de 19^{de} eeuw, toen men nog niet beschikte over de hedendaagse onderzoeksmogelijkheden. In het algemeen wordt tegenwoordig door een ruime meerderheid van de petroleumgeologen (op enkelen na, zoals Thomas Gold) aangenomen dat de abiogenische theorie een weinig waarschijnlijke verklaring biedt voor het ontstaan van aardolie. Het is verder ook niet relevant of het onder bepaalde omstandigheden theoretisch mogelijk is om bijvoorbeeld uit methaan aardolie te vormen. Wat wel van belang is, is op welke wijze het overgrote deel van de commercieel ontginbare aardolie gevormd wordt. De meeste geologen geven aan dat hiervoor een organisch ontstaan de beste verklaring biedt (Doeglas, et al., 1973).

2.3 Reserves

Omdat aardolie slechts onder specifieke omstandigheden (voldoende aanvoer organisch materiaal, zuurstofarm water, geschikte moeder- en reservoirgesteentes) wordt gevormd zijn de reserves ervan onevenredig verspreid over de wereld (bijlage 1). Meerbepaald blijkt uit figuur 2.3 dat de meerderheid van de bewezen reserves op het einde van 2007, met name 61 %, voorkomt in het Midden-Oosten (BP, 2008). De andere regio's in de wereld volgen op ruime afstand.

Indien men kijkt naar de individuele landen, bestaan er een aantal naties die een uitgesproken dominante positie bezitten. Zo blijkt namelijk uit de cijfers van BP dat maar liefst 21,3 % van de bewezen reserves aan Saoedi-Arabië toebehoren. Ook landen zoals Iran (11,2 %), Irak (9,3 %), Koeweit (8,2%), de Verenigde Arabische Emiraten (7,9 %), Venezuela (7,0 %) en Rusland (6,4%) beschikken over een belangrijk aandeel in de totale wereldreserves. Deze ongelijke spreiding houdt vanzelfsprekend in dat bepaalde landen een sterke machtspositie kunnen ontwikkelen. Deze machtspositie is zelfs nog vergroot omdat een aantal landen zich verenigd heeft binnen de

organisatie van olieproducerende landen, de OPEC¹. In 2005 bedroegen de gecombineerde reserves van deze landen maar liefst 76 procent van de totale bewezen wereldreserves (World Energy Council, 2007). Een berekening op basis van de recentere gegevens van BP (2008) geeft ongeveer hetzelfde resultaat, met name 75,7 procent.



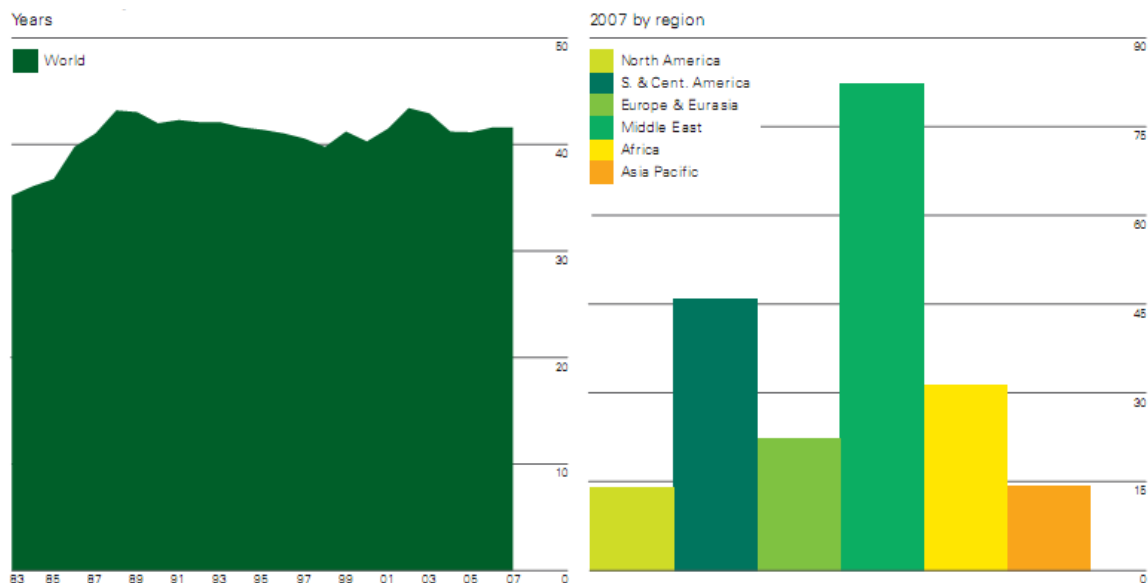
Figuur 2.3: Bewezen aardoliereserves per regio op het einde van 2007 (BP, 2008, p. 7)

Uit het verslag van BP (2008) blijkt verder dat de globale bewezen reserves eind 2007 worden geschat op 1237,9 miljard vaten. Ook schattingen van andere bedrijven en instellingen gaan uit van bewezen reserves van conventionele aardolie die in deze grootorde liggen (Johnsson & Kjärstad, 2009). Verder bedroeg de consumptie van ruwe aardolie in datzelfde jaar maar liefst 85,22 miljoen vaten (met een inhoud van 157 liter) per dag. Een korte berekening toont aan dat de bewezen reserves voor ongeveer veertig jaar voldoende zullen zijn om aan het huidige consumptieniveau te voldoen. Hierbij dient in het achterhoofd te worden gehouden dat er geen rekening gehouden wordt met eventuele nieuwe ontdekkingen van aardoliereservoirs en, nog belangrijker, de verwachte stijging van de consumptie. Uit cijfers van het in 2008 verschenen Medium-Term Oil Market Report van het Internationaal Energie Agentschap (IEA) blijkt namelijk dat de verwachte groei van de vraag naar ruwe aardolie in de komende vijf jaar gemiddeld 1,6 procent per jaar zal stijgen. Dit komt overeen met een gemiddelde jaarlijkse toename van de consumptie met 1,5 miljoen vaten per dag. Hierbij kan men wel de kanttekening maken dat men door de wereldwijde economische crisis van 2008-2009 deze voorspelling waarschijnlijk naar onder zal moeten bijstellen. Zo zullen zowel 2008 als 2009 naar verwachting gekenmerkt worden door

¹ OPEC-lidstaten: Iran, Irak, Koeweit, Saudi-Arabië, Venezuela, Algerije, Angola, Ecuador, Libië, Nigeria, Qatar en de Verenigde Arabische Emiraten. (OPEC, 2009)

een vraagdaling ten opzichte van hun respectievelijk voorgaand jaar. Frappant hierbij is dat het van 1982/1983 geleden is dat de vraag naar aardolie gedurende twee opeenvolgende jaren afnam (International Energy Agency, 2009). Voorspellingen op basis van verwachte groeicijfers vóór het uitbreken van de crisis zullen dus naar verwachting te hoog uitvallen omdat hiermee nog geen rekening werd gehouden. Toch kan men in het algemeen stellen dat de vraag naar aardolie naar verwachting niet binnen afzienbare tijd zal teruglopen.

Men bekommt ongeveer dezelfde levensspan van aardolie indien men in plaats van de consumptie, de jaarlijkse productie relateert aan de bewezen reserves. Dit noemt men de R/P-ratio (Greene, Hopson, & Li, 2006). Zoals uit onderstaande figuur valt af te leiden schommelt deze reeds enige tijd rond de veertig jaar. Dit betekent dat nieuwe ontdekkingen van aardolie en verbeteringen in productietechnieken gelijke tred hebben gehouden met de geproduceerde hoeveelheid aardolie. Verder valt bij het rechtse gedeelte van de grafiek de dominantie van het Midden-Oosten opnieuw op. Waar in enkele regio's de R/P ratio onder de 15 jaar blijft, is deze voor het Midden-Oosten meer dan 80 jaar. Binnen afzienbare tijd zal de afhankelijkheid van de wereld ten opzichte van deze regio op het vlak van aardolie dus gevoelig groter worden (BP, 2008).



Figuur 2.4: De reserves-productieratio: globaal en per regio (BP, 2008, p. 10)

Ondanks de relatief stabiele R/P ratio is een substantieel deel van de ooit gevormde reserve van aardolie reeds geproduceerd. Zo bedroeg de cumulatieve productie van ruwe aardolie op het einde van het jaar 2005 ongeveer 143 miljard ton. Dit komt overeen met 1048 miljard vaten². Hieruit kan men dus afleiden dat op het einde van 2005 reeds 47 % van de gevormde bewezen

² 1 ton ruwe aardolie= 7,33 vaten (Belgische Petroleum Federatie, 2009)

aardoliereserve was ontgonnen, waarvan de helft in de laatste 23 jaar (World Energy Council, 2007).

Men dient er echter ook rekening mee te houden dat de cijfers voor bewezen reserves uit het statistisch rapport van BP gebaseerd zijn op aardolie 'waarvan geologische en technologische informatie aangeeft dat deze met redelijke zekerheid in de toekomst kan ontgonnen worden uit bekende reservoirs, tegen de huidige economische en technologische condities'. Men kan echter ook uitgaan van een bredere definitie, de zogenaamde 'estimated ultimate recovery' (EUR). Deze omvat zowel de cumulatieve productie, de reserves en de resources. Resources zijn ontdekte aardoliebronnen die onder de huidige omstandigheden niet economisch verantwoord kunnen ontgonnen worden maar waarvan men dit in de toekomst wel mogelijk acht, alsmede de bronnen die volgens de geologische theorie mogelijk zijn maar die nog niet ontdekt zijn. Op het einde van 2005 werd deze estimated ultimate recovery op 387 miljard ton (2837 miljard vaten) geschat. Ongeveer 37 % van deze hoeveelheid was op dat moment reeds geproduceerd (World Energy Council, 2007).

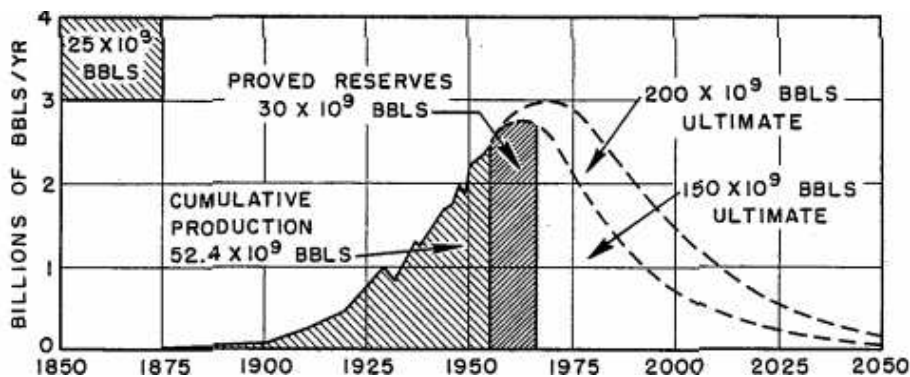
De werkelijke waarde van deze R/P- en EUR-schattingen valt echter te betwijfelen omdat de olieproductie niet 40 jaar of meer gewoon zal doorgaan en dan van de ene dag op de andere zal stilvallen. Er zal namelijk vanaf een bepaald punt een geleidelijke daling optreden die steeds uitgesprokener zal worden. Het optreden van deze piek zal voor de economische realiteit van concreter belang zijn (Hirsch et al., 2005).

2.4 Peak oil

"The easy, cheap oil is over, peak oil is looming."

Uit deze uitspraak van Shokri Ghanem, het hoofd van de National Oil Corporation van Libië, in een artikel van Leff (2008) blijkt dat de wereld zich dient op te maken voor een tijdperk waarin goedkope olie enkel een herinnering uit het verleden is. De huidige bewezen reserves blijken, bij huidige productie- en consumptiehoeveelheden, voldoende om de mensheid voor ongeveer veertig jaar in zijn noden te voorzien (BP, 2008). De werkelijke economische realiteit is zelfs nog minder rooskleurig. De laatste liter aardolie zal namelijk nooit geproduceerd en geconsumeerd worden omwille van de hoge kostprijs die eraan verbonden zal zijn (Hirsch et al., 2005). Het begrip peak oil is dan ook aangewezen om de werkelijke economische impact van het niet-hernieuwbare karakter van aardolie te begrijpen.

De term peak oil werd voor het eerst gebruikt door de Amerikaanse geofysicus Marion King Hubbert (Balaban & Tsatskin, 2008). Hij stelde dat de productie van een eindige grondstof drie fasen doorloopt. Deze zal starten vanuit het niets en daarna blijven stijgen tot een maximum wordt bereikt. Vanaf het bereiken van dat maximum zal de productie enkel maar kunnen dalen. Dit gaat zo verder totdat de grondstof uitgeput of niet meer rendabel te ontginnen is. Hubbert voerde aan dat dit proces ook voor aardolie van toepassing is. Meerbepaald stelde hij een theorie voorop waarbij de productiefunctie van aardolie een klokvormige verdeling volgt (Hubbert, 1956). Met behulp van deze productiefunctie, die weergegeven is in figuur 2.5, voorspelde hij reeds in 1956 dat de aardolieproductie in de Verenigde Staten (uitgezonderd Alaska en Hawaï) zijn maximum zou bereiken tussen 1966 en 1971. Achteraf bleek dat de piek optrad in 1970 en zijn voorspelling dus correct was (Peak Oil Netherlands Foundation, 2005).



Figuur 2.5: Hubbert's voorspelling voor het verloop van de aardolieproductie in de Verenigde Staten (Hubbert, 1956, p. 22-2)

Ondanks de accuraatheid van zijn voorspelling voor de olieproductie van de Verenigde Staten, kreeg de theorie van Hubbert reeds snel kritiek. Tegenstanders stellen dat de theorie niet kan toegepast worden op de wereld als een geheel. Ze argumenteren dat de productiecurven van vele landen niet de klokvormige curve van Hubbert volgen en dat de resultaten in het rapport niet statistisch gestaafd kunnen worden (Kaufmann & Shiers, 2008).

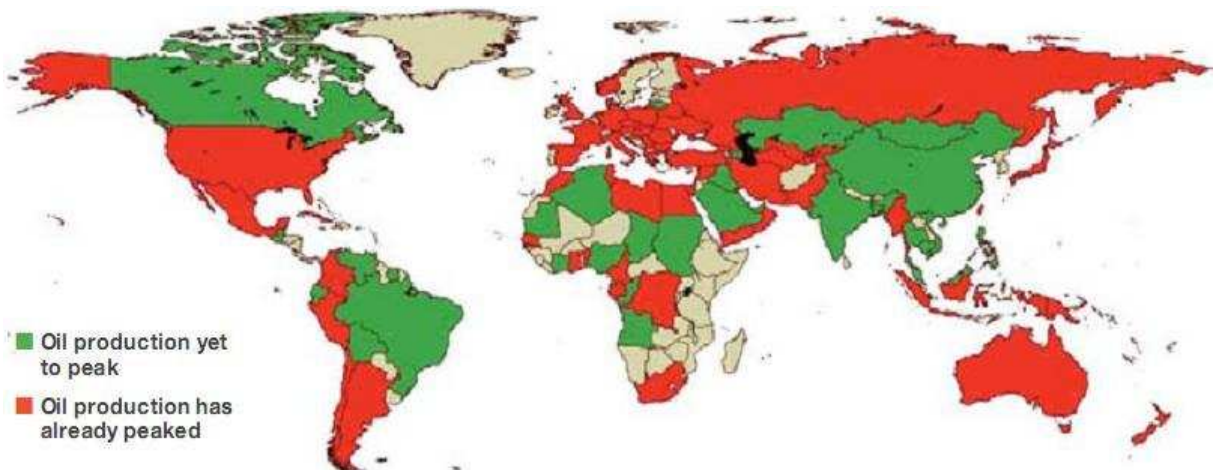
Niettegenstaande de kritieken op Hubbert's theorie, is vooral het algemene idee dat erachter zit van belang. De kernzaak is namelijk dat de aardolieproductie op een bepaald moment een piek zal bereiken en vanaf dan enkel maar zal afnemen (Greene et al., 2006). Rond het juiste tijdstip van deze piek in de productie heerst grote onzekerheid. Uit de verschillende voorspellingen, af te lezen uit tabel 2.1, kan echter wel worden afgeleid dat een groot deel van de analisten het met elkaar eens is dat de piek zal optreden vóór het jaar 2030 (National Energy Technology Laboratory, 2007). Ook Kaufmann & Shiers (2008) bevestigen in hun onderzoek dat het pieken van de aardolieproductie in de nabije toekomst waarschijnlijk is. In het door hun vooropgestelde model treedt deze piek, in 54 van de 64 bestudeerde scenario's, ergens tussen 2010 en 2032 op. Ze

merken ook op dat hoewel ze in de verschillende scenario's grote verschillen tussen de variabelen (zoals de grootte van de overgebleven reserves) inbouwen, dit slechts een beperkt effect heeft op het tijdstip waarop de aardolieproductie zal pieken.

Tabel 2.1: Voorspellingen rond het pieken van de aardolieproductie (Peak Oil Netherlands Foundation, 2005, p. 7)

Source of Projection	Projected date	Source of Projection	Projected date
Individual Experts		Governments	
A. Bakhtiari	2006-2007	Dutch Government (IEA HI copy)	After 2030
M. Simmons	2007-2009	French Government	2020-2030
C. Skrebowski	2007-2010		
K. Deffeyes	2005-2009	Analyst firms	
J. Laherrère	2010-2020	IHS Energy*	2011-2020
P. Odell	2060	Douglas Westwood	2010-2020
B. Pickens	2005-2007	Energy Files	2010-2020
M. Lynch	After 2030	PFC Energy	2014-2025
C. Campbell	2010		
S. Al-Husseini	2015	Energy advisory organisations	
J. Gilbert	2010	World Energy Council	After 2020
T. Petrie	Before 2010	Energy Research Center Netherlands	2010-2035
		CERA	After 2020
Oil Companies		ASPO	2010
CNOOC	2005-2010	IEA deferred investment scenario	Around 2020
Total	2020-2025	IEA high resource case	After 2030
Shell	After 2025		
BP	We cannot know	Other Organizations	
Exxon-Mobil	After 2030	Volvo	2010-2015
		Ford	2005-2010

De productie van een individuele oliebron kent vanaf de opstart een geleidelijke groei, totdat een bepaald maximum bereikt wordt. Dit maximum treedt op wanneer ongeveer de helft van het reservoir ontgonnen is. Vanaf dit punt zal de productie van de individuele bron steeds dalen omwille van minder gunstige ontginningsomstandigheden (Hirsch et al., 2005). Wat waar is voor een individuele bron, zal naar verwachting ook waar zijn voor de verzameling van alle oliebronnen. Vanaf het moment dat wereldwijd ongeveer de helft van de aardolie is opgebruikt, zal de globale productie beginnen te dalen. In sommige landen zullen er nog productiestijgingen mogelijk zijn, maar deze kunnen de dalingen over de rest van de wereld niet meer opvangen. Zoals uit figuur 2.6 valt af te lezen, heeft de productie zijn piek al bereikt in meer dan 60 van de 98 olieproducerende landen (The Oil Depletion Analysis Centre and Post Carbon Institute, 2008). Overigens kent het aantal ontdekkingen en nieuwe oliebronnen een sterke terugval sinds de piek ervan in 1980 (Leder & Shapiro, 2008). Zo blijkt dat in 1998 ongeveer 80 % van de geproduceerde aardolie afkomstig was van velden die ontdekt zijn voor 1973. Een groot aantal hiervan wordt gekenmerkt door een productieafname (Campbell & Laherrère, 1998).



Figuur 2.6: Landen waar de aardolieproductie al dan niet zijn piek bereikt heeft (The Oil Depletion Analysis Centre and Post Carbon Institute, 2008, p. 2)

Tegenstanders van de peak oil-theorie voeren aan dat stijgende oliepijzen en verbeterde technologische mogelijkheden de aardolieproductie in de toekomst zullen blijven opdrijven en er dus nooit een piekmoment zal optreden (Greene et al., 2006). Hirsch et al. (2005) stellen echter dat het weinig waarschijnlijk is dat dit in voldoende mate zal gebeuren. Ze halen hiervoor de analogie aan met de situatie van de Verenigde Staten in de periode 1970-2000. In deze periode maakte men grote technologische verbeteringen mee op het vlak van olieveldontwikkeling en traden er grote prijsstijgingen op als gevolg van de oliecrisis van de jaren '70. Beide gebeurtenissen bleken amper van invloed te zijn op de aardolieproductie in de Verenigde Staten en zullen daarom naar verwachting ook van gering belang zijn op wereldvlak. Verder dient er weinig heil verwacht te worden van nog onontdekte aardoliereservoirs. Vergevoerde opsporingstechnieken hebben de grootste en makkelijkst ontginbare reservoirs reeds blootgelegd en nieuwe, substantiële ontdekkingen zijn dan ook minder waarschijnlijk als voorheen (Hirsch et al.).

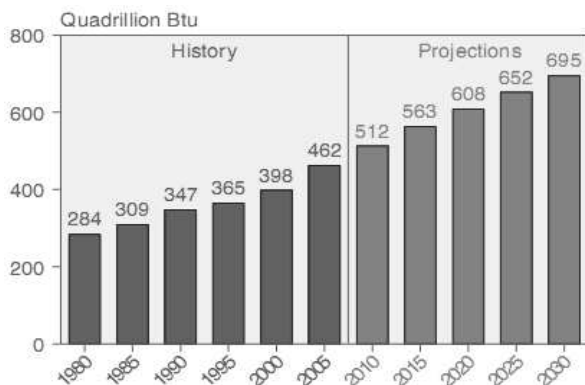
Op het moment dat de aardolieproductie piekt, zullen er nog grote reserves van de grondstof beschikbaar zijn. Toch zal deze piek aanzienlijke problemen met zich meebrengen (Leder & Shapiro, 2008). Zo zullen, zeker indien men rekening houdt met de verwachte vraagstijging over de komende jaren, de prijs en de prijsvolatiliteit van aardolie stijgen. Aangezien de olieprijs een belangrijke determinant is in de prestaties van de globale economie, zal deze hieronder lijden. Men kan veronderstellen dat de wereld een stijging van de inflatie en werkloosheid, gepaard met een daling van de output van goederen en diensten tegemoet kan zien. Een vroegtijdig en correct optreden bij het omgaan met het pieken van de aardolieproductie is dus essentieel (Hirsch et al., 2005).

Hoofdstuk 3: Aardolie en de economie

Het verbruik van aardolie in zijn verschillende toepassingen is alomtegenwoordig. Economisch gezien is de grondstof dan ook van groot belang. In dit hoofdstuk zal dieper worden ingegaan op de economische aspecten verbonden aan aardolie. Hiertoe zal eerst worden ingegaan op het wereldwijde energieverbruik en de verwachte evolutie ervan. Het belang van aardolie in dit energieverbruik zal vervolgens uiteraard nader onderzocht worden. Ook voor België wordt in het tweede deel van dit hoofdstuk een gelijkaardige analyse gemaakt. Aangezien zowel op nationaal als globaal niveau blijkt dat aardolie een belangrijke rol speelt en zal blijven spelen, wordt in het laatste gedeelte van het hoofdstuk dieper ingaan op de concrete economische impact die een stijging van de olieprijs in het algemeen, en piekolie in het bijzonder, met zich meebrengt.

3.1 Energie en de wereld

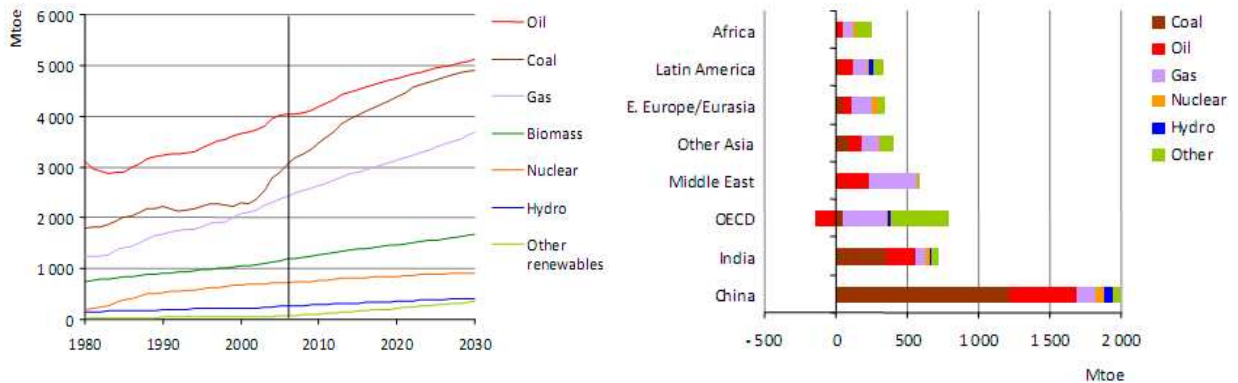
De wereldwijde energiebehoefte zal in de toekomst alleen maar stijgen. Een sterke bevolkings- en economische groei in landen zoals China en India is hier niet vreemd aan. Recente schattingen gaan uit van een groei van de wereldwijde energievraag van meer dan 40 procent tussen nu en 2030. Dit betekent een jaarlijkse groei van 1,6 procent (International Energy Agency, 2008d).



Figuur 3.1: Voorbije en verwachte evolutie van de wereldwijde energiebehoefte (Energy Information Administration, 2008, p. 7)

Zoals uit figuur 3.2 kan worden afgeleid, verwacht men dat deze vraag voor het grootste deel zal moeten worden opgevangen door een toename van de consumptie van fossiele brandstoffen. Aardolie blijft de belangrijkste primaire energiebron, terwijl vooral steenkool een sterke opmars maakt. Het zijn niet toevallig China en India die verantwoordelijk zijn voor de grote verwachte

stijging in het verbruik van steenkool en, in mindere mate, aardolie. In de OECD-landen³ zet men eerder in op aardgas en andere energiebronnen (zoals hernieuwbare energie), terwijl het verbruik van aardolie naar verwachting zelfs zal afnemen (Energy Information Administration, 2007b).

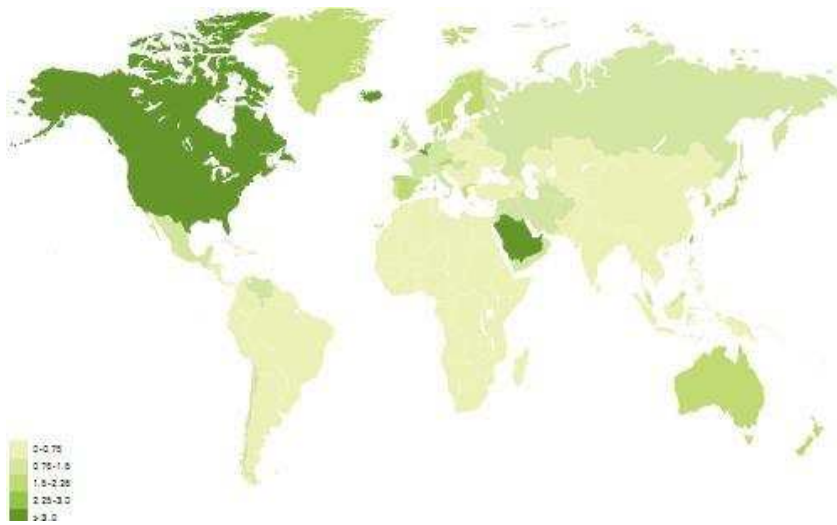


Figuur 3.2: Evolutie van het verbruik van de verschillende primaire energiebronnen tegen 2030, globaal en per regio (International Energy Agency, 2008d, p. 2 & 3)

3.2 Energiesituatie in België

Uit figuur 3.3 valt onmiddellijk op dat België een van de meest aardolie-intensieve landen ter wereld is (BP, 2008). Dit maakt het land, en de economie ervan uiteraard meer gevoelig voor de negatieve gevolgen van het pieken van de aardolieproductie. Een reden hiervoor kan gevonden worden in het feit dat sectoren die zeer afhankelijk zijn van aardolie; zoals de petrochemische-, farmaceutische- en transportsector; in België een groot economisch belang hebben. Zo vormt de petrochemische industrie in Antwerpen het tweede grootste cluster van dergelijke bedrijven ter wereld en heeft België vanwege zijn centrale ligging in Europa een belangrijke rol als doorvoerland. (Belgische Petroleum Federatie, 2007b).

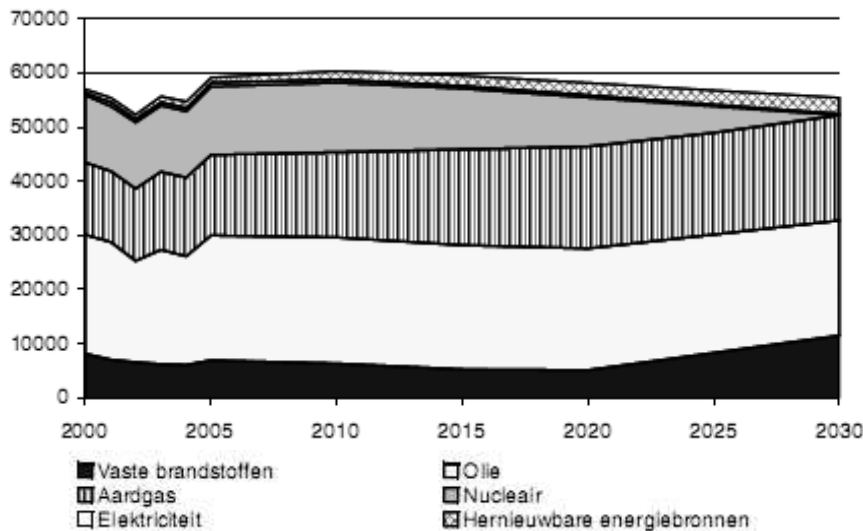
³ OECD-landen (Ned. : OESO): groepering van 30 landen die de principes van democratie en vrijmarkteconomie respecteren. De groep is voornamelijk samengesteld uit ontwikkelde landen: Australië, Oostenrijk, België, Canada, Tsjechië, Denemarken, Finland, Frankrijk, Duitsland, Griekenland, Hongarije, IJsland, Ierland, Italië, Japan, Zuid-Korea, Luxemburg, Mexico, Nederlands, Nieuw-Zeeland, Noorwegen, Polen, Portugal, Slowakije, Spanje, Zweden, Zwitserland, Turkije, het Verenigd Koninkrijk, de Verenigde Staten (OECD, z.d.)



Figuur 3.3: Wereldwijde aardolieconsumptie per capita in 2007, in ton (BP, 2008, p. 13)

Naast de grote aardolie-intensiteit van de economie heeft België ook nog eens zelf geen inheemse aardolieproductie, waardoor het land extra kwetsbaar is (FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie, 2006). Om dit risico enigszins af te zwakken importeert België aardolie vanuit diverse landen. Rusland vormt het belangrijkste importland, gevolgd door landen uit het Midden-Oosten (Saudi-Arabië, Iran, Irak) en het Noordzeegebied (Verenigd Koninkrijk, Noorwegen). Zij staan in voor respectievelijk ongeveer 47, 28 en 16 procent van de totale invoer. Hierbij valt op dat de afhankelijkheid van de OPEC-landen sinds de oliecrisis sterk is afgebouwd, met name van 97,2 procent in 1973 naar 32,5 procent in 2007 (Belgische Petroleum Federatie, 2007a).

Het Federaal Planbureau publiceerde in 2007 een rapport waarin het een inzicht geeft in het huidige primaire energieverbruik in België en bovendien voorspellingen maakt voor de toekomst. Op figuur 3.4 is te zien dat het primair energieverbruik naar verwachting tot 2010 gestaag stijgt, wanneer het met ongeveer 60 Mtoe (hetgeen overeenkomt met de energie die vrijkomt bij het verbranden van 60 miljoen ton aardolie) een maximum bereikt. Vanaf dan zou de energievraag dalen. De auteurs halen hier wel bij aan dat deze daling niet alleen te wijten is aan een verbetering van de energie-efficiëntie maar ook aan een statistisch gevolg van de uitstap uit kernenergie die onlangs door de Belgische regering is opgelegd. Traditioneel wordt aan kerncentrales een efficiëntie van 30 procent toegedicht. Huidige en toekomstige centrales op basis van fossiele brandstoffen en hernieuwbare energiebronnen halen vaak hogere omzettingsrendementen waardoor de afbouw van kerncentrales leidt tot een (statistisch gezien) relatief lager energieverbruik.



Figuur 3.4: Samenstelling van de Belgische vraag naar primaire energie (in ktoe) (Federaal Planbureau, 2007, p. 24)

Indien men kijkt naar de samenstelling van de primaire energievraag over de beschouwde periode heen kan men enkele tendensen opmerken. Allereerst valt de beslissing van de regering om uit kernenergie te stappen duidelijk op te merken. Tegen 2030 zal het verbruik hiervan naar nul terugvallen. Vaste brandstoffen (waaronder steenkool) kennen in het begin een terugval, maar zullen vanaf 2020 een belangrijkere rol spelen en dit vooral bij het opvangen van het gat dat kernenergie achterlaat. Ook aardgas zal hierbij op de voorgrond treden, en nog in grotere mate dan de vaste brandstoffen. Het verbruik van deze energiebron zal namelijk naar verwachting een sterke stijging kennen, van een aandeel van 23 procent in het jaar 2000 naar één van 35 procent in 2030. Daarnaast valt ook nog een zeer beperkte hoeveelheid aan geïmporteerde elektriciteit in de statistieken op te merken (Federaal Planbureau, 2007).

Aardolie blijkt gedurende de gehele periode de belangrijkste energiebron te zijn. Het relatieve aandeel ervan in de totale energievraag blijft over de beschouwde periode ongeveer constant. Hernieuwbare energiebronnen kennen ten slotte een spectaculaire stijging, vooral in de beginperiode, waardoor hun aandeel op het einde van de projectieperiode naar verwachting op ongeveer 5,5 procent van het totale primaire energieverbruik zal uitkomen. De auteurs geven aan dat dit in 2030 bovendien de enige resterende binnenlandse bron van energie zal zijn, waarbij vooral een belangrijke rol is weggelegd voor biomassa en windenergie. De verwachte energiemix heeft namelijk tot gevolg dat België voor 95 procent van zijn energiebehoeften van het buitenland afhankelijk zal zijn vanwege de afwezigheid van inheemse aardolie- en gasvoorraden en het afbouwen van kernenergie (Federaal Planbureau, 2007).

3.3 Economische impact aardolie

De prijs van aardolie oefent door middel van een aantal kanalen een invloed uit op de economische toestand van individuele landen en de globale economie. Zo zal een prijsstijging op macro-economisch vlak tot gevolg hebben dat er een transfer van inkomen optreedt van olie-importerende landen naar de exporterende landen. De impact van dit inkomenseffect voor het netto-importerende land zal afhangen van de mogelijkheid van gebruikers om over te schakelen naar alternatieven, de mate van afhankelijkheid van geïmporteerde aardolie en het belang van de kost van aardolie in het nationale inkomen. Feit is echter dat dit, in welke mate dan ook, een negatieve invloed zal hebben op de bestedingen voor andere doeleinden omdat een deel van het budget van de individuen en bedrijven wordt opgeslokt door de hogere olieprijs. Voor de netto-exporterende landen zal een prijsstijging in eerste instantie aanleiding geven tot een stijging van het nationale inkomen. Op termijn zal deze stijging echter worden afgezwakt door een daling van de export van aardolie omwille van de resulterende vertraging van de economische groei bij zijn handelspartners (International Energy Agency, 2004a).

Naast deze directe verschuiving van inkomen zijn er nog een aantal andere belangrijke gevolgen voor de economie op te merken. Omdat aardolie voor vele producten een belangrijke input in de productie en het transport ervan is, zal de prijs van deze producten over het algemeen (afhankelijk van de mate waarin deze stijgingen kunnen worden doorgerekend) stijgen. Ook zal de prijs van alternatieve energiebronnen zoals aardgas stijgen omwille van een verhoogde vraag die voortvloeit uit het feit dat aardolie duurder wordt om te verbruiken. Een prijsstijging van aardolie heeft dus ook een stijging van het algemeen prijspeil tot gevolg. Dit zal op zijn beurt leiden tot een algemene daling van de consumptie, hetgeen een negatieve invloed heeft op de investeringen van bedrijven (Lardic & Mignon, 2008).

Deze lagere investeringen, gecombineerd met een lagere vraag zullen ervoor zorgen dat de bedrijven hun productie zullen verlagen. Indien men hierbij nog in acht neemt dat er een opwaartse druk op de nominale lonen zal ontstaan omdat werknemers hun reële loon zien dalen door de hogere inflatie, kan men snel concluderen dat een stijging van de werkloosheid op korte termijn een logisch gevolg is (Jones, Leiby, & Paik, 2004). Verder zullen, vanwege de reeds eerder aangehaalde gevolgen, de belastingsinkomsten van de overheid dalen. Dit kan tot (stijgende) overheidstekorten leiden vanwege de rigiditeit die aan een groot deel van de uitgaven van de overheid verbonden is (International Energy Agency, 2004a).

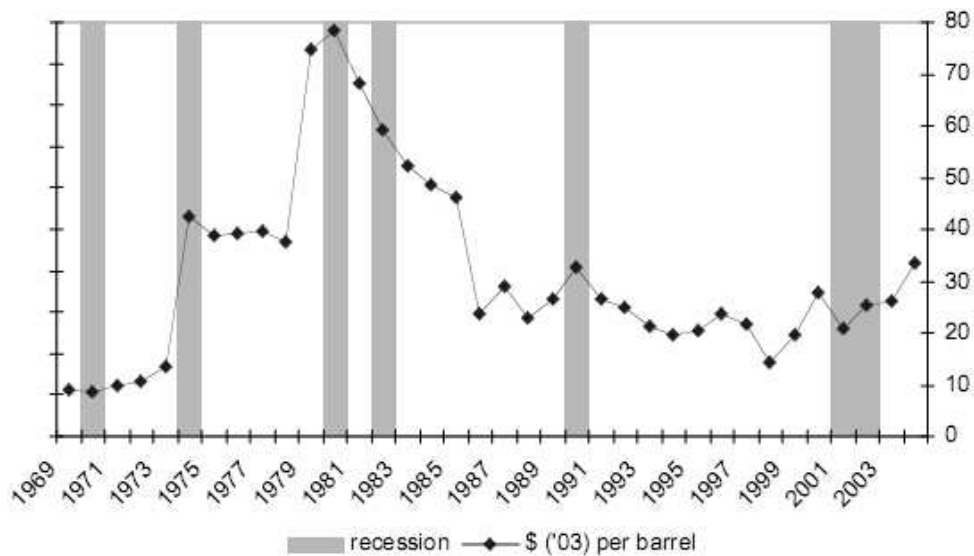
Een hogere olieprijs zal ook op de ontmoetingsplaats tussen vraag en aanbod, het aggregaat van de economie van de importerende landen een invloed hebben. In het algemeen zal een dergelijke prijsstijging het BBP van een land negatief beïnvloeden. De grootte van deze negatieve invloed op

het BBP en andere macro-economische indicatoren zoals inflatie en werkloosheid hangt af van een aantal factoren. Als de prijsstijgingen groot en onverwacht zijn zullen deze een grotere impact hebben omdat ze onrust kunnen veroorzaken bij consumenten en bedrijven waardoor die geen optimale beslissingen zullen maken. Ook is het macro-economisch effect groter indien deze prijsstijging lang wordt aangehouden. Verder speelt ook de toestand van de economie een rol (Energy Information Administration, 2006). Als de economie zich al in een slechte toestand bevindt en bijvoorbeeld te kampen heeft met hoge inflatie en/of werkloosheid, dan kan een prijsstijging van aardolie nog zwaardere gevolgen voor de economie hebben vanwege een beperking van de mogelijke fiscale en monetaire beleidsmaatregelen die ter beschikking staan van overheden en centrale banken. Deze beleidsmaatregelen vormen ook een vierde factor die de impact van een dergelijke prijsstijging bepaalt. Een correct economisch beleid zal waarschijnlijk de schadelijke economische effecten van een prijsstijging niet helemaal kunnen vermijden, maar ze wel kunnen matigen. Omgekeerd kan een inadequaat beleid deze gevolgen zelfs verergeren. Zo kan een contractief monetair en fiscaal beleid, gericht op het verminderen van de inflatie, leiden tot een verergering van de werkloosheid en de inkrimping van de economie. Volgens enkelen is een verkeerd economisch beleid na de eerste oliecrisis, en niet zozeer de oliecrisis zelf, de aanleiding geweest van de recessie in de jaren '70 van vorige eeuw (International Energy Agency, 2004a).

Het algemene mechanisme dat weergeeft op welke wijze een stijging van de prijs van aardolie de economie beïnvloedt is duidelijk en wordt algemeen aangenomen. Over de toepassing en de kwantificering ervan is echter minder duidelijkheid en eensgezindheid. Kwantitatieve schattingen van de gevolgen van de olieprijsstijgingen en -dalingen over de laatste vijftig jaar verschillen, vanwege het gebruik van verschillende modellen, nogal van elkaar (International Energy Agency, 2004a).

Toch kan men stellen dat deze effecten wel degelijk optreden. Zo werden de twee jaren na beide oliecrisisen gekenmerkt werden door een sterke terugval van de economische groei in olie-importerende landen. Een onderzoek uit 1983 toonde zelfs aan dat vanaf Wereldoorlog II in de Verenigde Staten alle recessies, op één na, werden voorafgegaan door een stijging in de olieprijs (Jones et al., 2004). Op figuur 3.5 wordt deze relatie grafisch aangetoond.

De prijsstijgingen van aardolie zijn natuurlijk niet alleen verantwoordelijk voor het optreden van de recessies, maar een negatieve relatie tussen de prijs van aardolie en de groei van het bruto binnenlands product wordt algemeen onderschreven. Overigens blijkt dat deze relatie asymmetrisch is en dus enkel opgaat voor prijsstijgingen. Een daling van de prijs van aardolie leidt, onder andere volgens Lardic & Mignon (2006), niet tot significante groeistijgingen van het BBP. Ook blijkt de invloed van een prijsstijging veel kleiner indien deze optreedt als tegenhanger van een voorafgaande prijsdaling, zoals bijvoorbeeld in de jaren '80 het geval was (Hamilton, 2003).



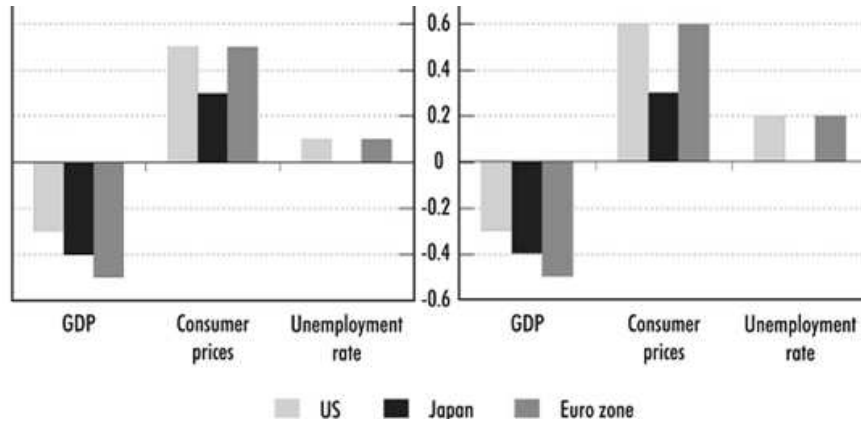
Figuur 3.5: Relatie tussen hoge olieprijsen en recessies in de Verenigde Staten in de periode 1969-2003 (Hirsch, Bezdek & Wendling, 2005, p. 29)

Voor het werkelijk kwantificeren van de invloed van een prijsstijging op macro-economische indicatoren worden in de praktijk twee benaderingen gebruikt. Een eerste benadering maakt gebruik van een tijdreeksanalyse van relevante historische informatie. In een tweede benadering gebruikt men economische modellen waarin de invloed van de verschillende macro-economische variabelen wordt inbegrepen (Energy Information Administration, 2006).

In een rapport van het International Energy Agency (2004a) wordt een dergelijk macro-economische model, Interlink, gebruikt om de invloed van een hoge olieprijs op de globale economie te bepalen. Zij schatten hiervoor via het model de gevolgen die een stijging van 25 dollar naar 35 dollar per vat die gedurende de periode 2004-2008 aanhoudt met zich meebrengt. Deze berekening wordt zowel voor OECD-landen als ontwikkelingslanden uitgevoerd omdat er significante verschillen tussen beide groepen optreden.

Binnen de OECD-landen zal een dergelijke prijsstijging een significant negatief effect hebben op de economische prestaties. Zo zal de economische groei gedurende de eerste twee jaar ongeveer 0,4 procent kleiner zijn dan dat deze zou zijn zonder de prijsstijging. De jaren hierna zal de negatieve impact kleiner zijn omdat de wereldwijde handel zich geleidelijk zal herstellen. Gemiddeld zal het BBP over de betreffende periode 0,3 procent lager liggen in vergelijking met het basisscenario zonder prijsstijging. Nog meer uitgesproken is de invloed op de inflatie. Deze ligt over de volledige periode gemiddeld 0,5 procent hoger dan in onveranderde omstandigheden. Verder ligt ook de werkloosheid hoger dan in het basisscenario. De gemiddelde stijging van 0,1 procent komt overeen met ongeveer 400 000 jobs binnen de OECD-landen. Overigens varieert de impact op deze macro-

economische indicatoren naargelang de importafhankelijkheid en energie-intensiteit van de economieën. Zoals uit onderstaande figuur kan worden afgeleid, blijkt vooral de economische groei van landen uit de Euro-zone bedreigt. De Verenigde Staten hebben hier minder onder te leiden, maar krijgen ook af te rekenen met een hogere werkloosheid en vrij sterke inflatiestijging (International Energy Agency, 2004a).



Figuur 3.6: Procentuele invloed van een stijging van de aardolieprijs met 40 procent op belangrijke economische indicatoren, in jaar 1 respectievelijk jaar 2 na de stijging (International Energy Agency, 2004a, p. 9)

Verder blijkt uit hetzelfde rapport dat de negatieve economische gevolgen van een prijsstijging zwaarder doorwegen voor ontwikkelingslanden en overgangseconomieën. Voor de Sub-Sahara landen loopt het geschatte verlies aan bruto binnenlands product gedurende het eerste jaar na de prijsstijging op tot meer dan 3 procent. Ook voor Azië zijn de gevolgen zwaarder dan voor de Westerse wereld. Hier treedt tijdens het eerste jaar een inflatiestijging van 1,4 procent en een groeivertraging van 0,8 procent op. Ook Park (2008) ziet een groter risico voor Azië dan voor de Westerse wereld bij het optreden van een prijsstijging. Verder bevestigt zijn onderzoek dat er vooral een sterke druk op de inflatie zal optreden en in mindere, doch evenzeer substantiële, mate op de economische groei.

Uit tabel 3.1 blijkt dat ook China en India, belangrijke opkomende motoren van de globale economie, niet gespaard blijven (Park, 2008). De Afrikaanse en Aziatische economieën worden het hardst getroffen door een prijsstijging van aardolie omwille van hun hoge afhankelijkheid van geïmporteerde olie. Daarenboven vertegenwoordigen energie-intensieve industrietakken vaak een groter deel van hun BBP en wordt energie er minder efficiënt gebruikt. Uit cijfers blijkt dat ontwikkelingslanden gemiddeld meer dan twee keer zoveel aardolie gebruiken om één eenheid aan economische output te produceren dan ontwikkelde landen (International Energy Agency, 2004a).

Tabel 3.1: Procentuele invloed van een stijging van de aardolieprijs met 40 procent op belangrijke economische indicatoren in ontwikkelingslanden, in jaar 1 na de stijging (International Energy Agency, 2004a, p. 10)

	Real GDP	Inflation	Trade Balance (% of GDP)
Asia	-0.8	1.4	-1.0
China	-0.8	0.8	-0.6
India	-1.0	2.6	-1.2
Malaysia	-0.4	2.0	0.0
Philippines	-1.6	1.6	-2.0
Thailand	-1.8	0.8	-3.0
Latin America*	-0.2	1.2	0.0
Argentina	-0.4	0.2	0.2
Brazil	-0.4	2.0	-0.4
Chile	-0.4	2.0	-1.4
Highly indebted poor developing countries ⁷	-1.6	n.a.	n.a.

Verder blijkt het netto-effect op de wereldeconomie negatief te zijn. De economische boost die gepaard gaat met hogere olieprijsen voor olieproducerende landen wordt overstegeen door het negatieve effect voor olie-importerende landen. Volgens schattingen zou het nettoverlies ongeveer 0,5 procent van het globale BBP bedragen tijdens het eerste jaar. Tegen het einde van de beschouwde periode zou het negatieve effect op de globale economische groei iets afzwakken vanwege de gestegen vraag naar producten en diensten in de olieproducerende landen. Een belangrijke determinant in de uiteindelijke grootte van het verlies aan economische groei is de manier waarop deze olie-exporterende landen de extra inkomsten aanwenden (International Energy Agency, 2004a).

De zonet beschreven schattingen voor de invloed van prijsstijgingen van aardolie worden algemeen aangenomen als minimumindicaties voor de daadwerkelijke impact (International Energy Agency, 2004a). Indien men vanuit de zonet beschreven resultaten de elasticiteit van het BBP met betrekking tot de olieprijs berekent bekomt men een vrij lage elasticiteit aangezien een stijging van de olieprijs met 40 procent slechts een daling van de groei in de Verenigde Staten met 0,3 procent veroorzaakt. De elasticiteit bij deze berekening bedraagt dus -0,0075. Ook andere macro-economische modellen bekomen elasticiteiten tussen -0,01 en -0,002 (Jones et al., 2004).

Schattingen op basis van tijdreeksanalyses tonen een aanmerkelijk hogere impact aan. Bij dit soort modellen kan men in de wetenschappelijke literatuur bij een olieprijschok voor de Verenigde

Staten elasticiteiten terugvinden die zich in het algemeen bevinden tussen -0.025 en -0.055. Hierbij zou de prijsstijging van 25 naar 35 dollar per vat een groeivermindering tussen de 1 en 2,2 procent met zich meebrengen. Deze aanzienlijke verschillen worden ondermeer verklaard door het feit dat macro-economische modellen geen onderscheid maken tussen prijsstijgingen en -dalingen en onverwachte prijsschokken en geleidelijke prijsstijgingen. Uit historische empirische gegevens over de invloed van de aardolieprijs op de Amerikaanse economie blijken de elasticiteiten gegeven door deze economische modellen dan ook te laag uit te vallen (Jones et al., 2004).

Over de werkelijke impact van een prijsstijging van aardolie bestaat er dus onenigheid waardoor aangeraden wordt om de bekomen resultaten vaak eerder kwalitatief dan kwantitatief in acht te nemen. Dat deze impact bestaat komt namelijk wel naar voren uit de literatuur. Toch stellen sommige auteurs dat deze daadwerkelijke invloed het laatste decennium veel kleiner was dan de periodes daarvoor. Dit wijten ze aan de afwezigheid van andere negatieve schokken, een kleiner belang van aardolie in het bruto binnenlands product, flexibelere arbeidsmarkten en een verbeterd monetair beleid (Blanchard & Galí, 2007).

Omdat het optreden van een piek in de productie van aardolie naar verwachting sterke prijsstijgingen zal meebrengen kan een analyse van de gevolgen van de twee oliecrisisen van de jaren '70 een beeld geven van wat er de economie te wachten staat. Uiteraard dient men hierbij wel rekening te houden met het feit dat de huidige wereldeconomie niet meer dezelfde is als die in de jaren '70. De conclusies van Blanchard & Galí (2007) uit de vorige paragraaf gaven al aan dat de invloed op de economie in vergelijking met enkele decennia geleden minder desastreus zou kunnen zijn.

Hoewel de wereldeconomie bij het optreden van de eerste oliecrisis in 1973 al met enkele problemen te maken had, zoals een vrij hoge inflatie en het uiteenvallen van het Bretton Woods-systeem, heeft de verviervoudiging van de olieprijs ongetwijfeld in ruime mate bijgedragen aan de economische problemen die erop volgden (Parra, 2004). De eerder beschreven gevolgen van een prijsstijging van aardolie traden ook op in de nasleep van de oliecrisis. Zo was in december 1973 de gemiddelde jaarlijkse inflatie van industriële goederen 7 procent en steeg deze tot 13 procent exact een jaar later. Verder daalde de gemiddelde economische groei in de OECD-landen van meer dan 5 procent in de periode 1970-1973 naar 1,5 procent tussen 1974 en 1976. In sommige landen was er zelfs een negatieve groei op te merken (Venn, 2002). Verder werden ook de betalingsbalansen en handelsbalansen van landen beïnvloed. Zo liep de gezamenlijke betalingsbalans van de OECD-landen terug van een surplus van 3 miljard dollar in 1973 naar een tekort van 35 miljard dollar in 1974. Ontwikkelingslanden kenden op dit vlak vaak nog een sterkere achteruitgang. Deze kapitaalstroom liep voornamelijk in de richting van de olieproducerende landen. Die zagen een sterke stijging in hun surplus aan buitenlandse deviezen, met name van 6 miljard dollar in 1973 naar 60 miljard in 1974.

Ook de tweede oliecrisis had een sterke invloed op de economische prestaties en lag mee aan de basis van de recessie in 1980-1982. Tegelijkertijd tekende men een stijging van de inflatie van 7,8 procent op het einde van 1978 naar 13,6 procent tijdens de eerste helft van 1980 op. Tijdens beide crisissen viel overigens ook op dat de daaropvolgende daling van de olieprijsen geen merkbaar positief effect had op de economische toestand, zoals ook naar voren komt in de voorspellingsmodellen. Ook de grotere impact op de ontwikkelingslanden bleek reeds in de nasleep van deze oliecrisisen. Vooral de betalingsbalansen van die landen, vanwege het relatief grote aandeel van kosten van geïmporteerde olie in hun BBP (tot 14 procent in Sub-Sahara), kwamen onder druk te staan (International Energy Agency, 2004a). Om hier het hoofd aan te bieden gingen veel ontwikkelingslanden schulden aan, gebruik makend van de overvloed aan petrodollars van olieproducerende landen, die echter tijdens de tweede oliecrisis en de daarmee gepaard gaande economische malaise niet terugbetaald konden worden. Een gevolg hiervan was dat de schuldenberg van vele ontwikkelingslanden, vooral in Latijns-Amerika, astronomische hoogtes bereikte (Venn, 2002).

Met betrekking tot het pieken van de aardolieproductie worden door Hirsch et al. (2005) een aantal specifieke effecten op de wereldwijde economische toestand vooropgesteld. Een terugval van het aanbod van aardolie zal leiden tot een stijging van zowel de olieprijs als de volatiliteit daarvan. De impact van een aanhoudende daling van het aanbod en de daarmee gepaard gaande prijsstijging zal een negatieve invloed hebben op diverse belangrijke economische indicatoren. Een stijging van de inflatie en de werkloosheid, in combinatie met een daling van de output van goederen en diensten zal leiden tot een daling van de levensstandaard. De impact op de ontwikkelingslanden wordt ook door deze auteurs verondersteld hoger te zijn dan die op de Westerse landen. De verwachte stijging in de volatiliteit van de aardolieprijzen brengt bovendien extra negatieve economische gevolgen met zich mee. Vanwege het asymmetrisch effect van de prijs van aardolie op het BBP zullen prijsstijgingen een veel grotere schade toebrengen dan prijsdalingen teniet doen. Het netto-effect van een dergelijke beweging is dus negatief en door een gestegen volatiliteit van de prijs zal dit proces steeds vaker herhaald worden en zal de gecumuleerde schade dus ook steeds groter worden (Hirsch et al.).

Hoofdstuk 4: Aardolieproducten

Aardolie is als ruwe grondstof een weinig bruikbaar product. Het verkrijgt pas zijn grote maatschappelijke waarde als het wordt opgewerkt tot een uitgebreide verscheidenheid aan eindproducten. Deze vormen dan ook de onderzoeksfocus van dit hoofdstuk. Aardolie dankt de mogelijkheid om verwerkt te worden tot een groot aantal afgeleiden aan zijn bijzondere chemische samenstelling. Hier zal dan ook eerst dieper op worden ingegaan. In een volgend onderdeel wordt onderzocht welke chemische processen er in raffinaderijen worden ingeschakeld om deze bijzondere grondstof om te zetten in bruikbare eindproducten. Het gros van dit hoofdstuk wordt uiteraard gevormd door een onderzoek naar de verschillende producten en hun mogelijke toepassingen. Hierbij wordt bijzondere aandacht gegeven aan petrochemicaliën. Ten slotte wordt er ook een analyse gemaakt van het relatief belang van deze producten en gebruiken in het totale aardolieverbruik.

4.1 Chemische samenstelling aardolie

Aardolie is geen uniform product. Het is samengesteld uit verschillende componenten die qua belangrijkheid in de samenstelling van elkaar kunnen verschillen. Factoren zoals de locatie en ouderdom van het olieveld spelen een belangrijke rol in deze verschillen. Ook de diepte van de geboorde oliebron heeft een invloed. Hierdoor is het mogelijk dat twee naast elkaar gelegen oliebronnen licht verschillende aardolie opleveren. Ondanks de verschillen die kunnen optreden in de samenstelling van aardolie, kan men stellen dat in het algemeen alle geproduceerde aardolie een vergelijkbare moleculaire compositie heeft (Speight, 2006).

Ruwe aardolie is een complex mengsel dat voor het overgrote deel bestaat uit koolwaterstoffen. Deze komen in een groot aantal verschillende vormen voor, van de kleinste vorm met maar één koolstofatoom (methaan) tot moleculen met meer dan driehonderd koolstofatomen (Guthrie, 1960). Hiernaast bevinden er zich kleine hoeveelheden organische componenten die heteroatomen zoals zwavel, zuurstof en stikstof bevatten in de vloeistof. Ook metallische elementen zoals vanadium, nikkel, ijzer en koper komen er, zij het in zeer beperkte mate, in voor (Ajayi, Akinlua, Tchokossa, & Torto, 2009). Zoals uit tabel 4.1 kan worden afgelezen varieert het aandeel van deze elementen in de samenstelling van aardolie, op uitzonderingen na, binnen vrij beperkte grenzen.

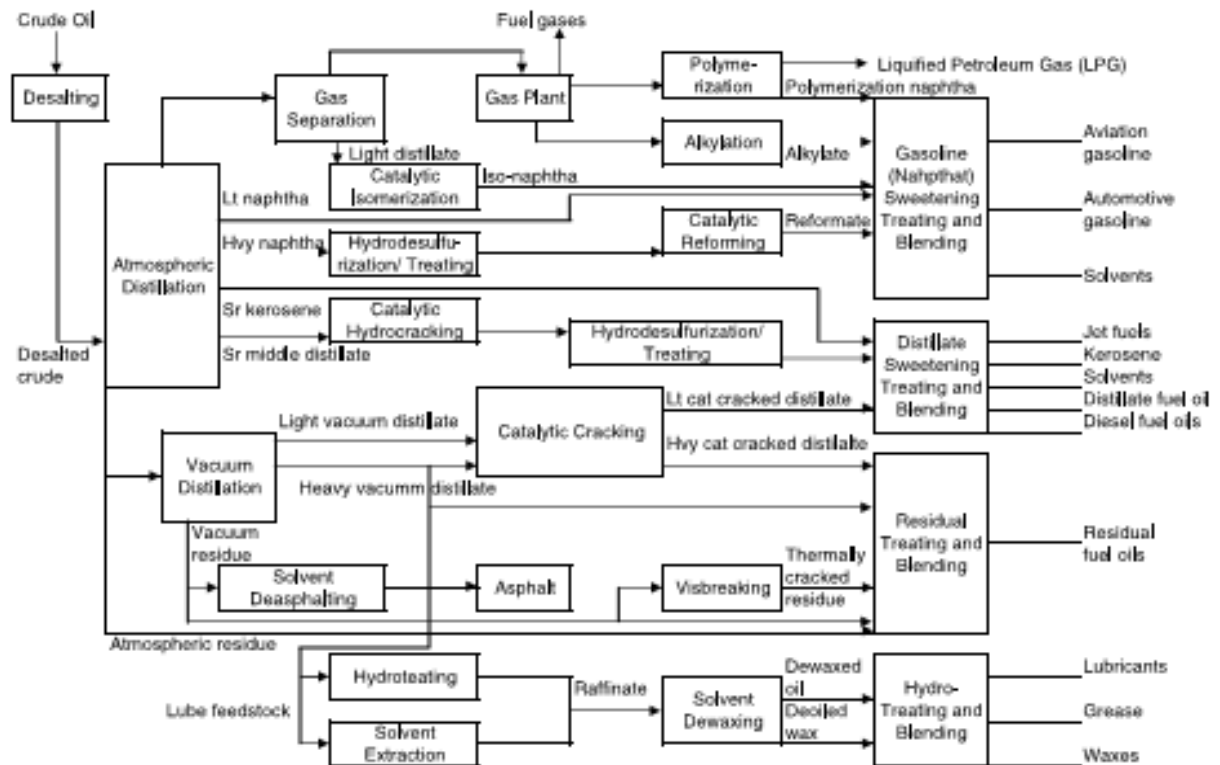
Tabel 4.1: Elementen die voorkomen in aardolie en hun aandeel in de samenstelling ervan (Speight, 2006, eigen opmaak)

Element	Symbool	Aandeel
Koolstof	C	83,0 - 87,0 %
Waterstof	H	10,0 - 14,0 %
Stikstof	N	0,1 - 2,0 %
Zuurstof	O	0,05 - 1,5 %
Zwavel	S	0,05 - 6,0 %
Metaalsporen	Ni,V,...	< 1000 ppm

Ondanks dat het belang van onzuiverheden in de aardolie vrij gering is, dient de impact ervan niet onderschat te worden. Ze vormen namelijk een belangrijke factor in de verwerkbaarheid van de ruwe grondstof. Zo kunnen ze tijdens de raffinage zorgen voor vergiftiging van de katalysator, corrosie van de installatie en een grotere uitstoot van vervuilende stoffen (Marshall & Rodgers, 2008). Ook kunnen overblijvende sporen in het eindproduct de producteigenschappen verstoren. Deze niet-koolwaterstoffen zullen dan ook door allerlei chemische processen uit de ruwe aardolie gehaald worden. (Speight, 2006).

4.2 Raffinageprocessen

Vooraleer aardolie kan gebruikt in voor de maatschappij nuttige toepassingen, dient deze een aantal raffinageprocessen te ondergaan. Deze processen kunnen ruwweg ingedeeld worden in drie opeenvolgende fases: scheiding, conversie en afwerking. Een volledig overzicht van de mogelijke raffinageprocessen is op figuur 4.1 weergegeven.



Figuur 4.1: Schematisch overzicht van de processen in een raffinaderij (Al-Muslim & Dincer, 2005, p. 640)

Alvorens men aan de scheiding van de ruwe aardolie begint, zal men hier vaak een voorbereiding op uitvoeren. Men zal een zogenaamde ontzouting en ontwatering doorvoeren waardoor de aardolie gezuiverd wordt van water en wateroplosbare mineralen (Speight, 2006). Indien men dit niet zou doen zouden er raffinageproblemen en corrosie van de installaties kunnen optreden (Hesampour, Norrouzbahari, & Roostazad, 2009).

4.2.1 Scheidingsprocessen

Nadat de stroom ruwe aardolie de voorbehandeling heeft doorlopen kan het scheidingsproces aanvangen. In deze fase wordt de aardolie door middel van een aantal methodes gescheiden in diverse stromen (Al-Muslim & Dincer, 2005).

Een eerste techniek die hierbij kan worden gebruikt is atmosferische distillatie. Hierbij wordt de voedingsstroom verhit waarna men gebruik maakt van de verschillende kooktemperaturen van de fracties om deze in een distillatietoren van elkaar af te scheiden (Gonçalves, da Mota, Ribeiro, Teixeira, & Teixeira, 2005). Een hierop aansluitende techniek die vaak gebruikt wordt bij het scheidingsproces is de vacuümdistillatie. Men gebruikt deze methode om producten die bestaan uit

de zwaardere fracties van de koolwaterstoffen, zoals bijvoorbeeld smeerolie, toch af te kunnen scheiden van de rest (Al-Muslim & Dincer, 2005). Onder atmosferische druk is dit namelijk niet mogelijk omdat bij een temperatuur van 350 graden Celsius het residu begint af te breken. Dit kraken kan voorkomen worden door het uitvoeren van een vacuümdistillatie onder een kwikdruk van 50 tot 100 mm, in plaats van de gebruikelijke atmosferische druk van 760 mm kwikdruk. Hierdoor kunnen deze zwaardere fracties reeds bij lagere temperaturen gescheiden worden en zal er dus geen vernietiging van de moleculen optreden (Speight, 2006).

4.2.2 Conversieprocessen

Wanneer de ruwe aardolie is gescheiden in verschillende stromen kunnen deze in een tweede stap, de conversie, worden omgezet naar de eindproducten. Doorheen de jaren zijn hier een groot aantal processen in ontwikkeld. Deze kunnen onderverdeeld worden in drie grote groepen.

In een eerste soort processen worden grote moleculen omgezet tot kleinere. Veelgebruikte raffinagetechnieken hiervoor zijn visbreaking, coking en verschillende vormen van kraken. Met katalytisch, thermisch en hydrokraken worden grote complexe koolwaterstofmoleculen afgebroken tot kleinere om zo meer lichtere producten zoals benzine, diesel en stookolie te bekomen en residuen te verminderen (Molnár & Olah, 2003). Hierdoor verhoogd men de waarde van de ruwe aardoliestroom omdat zware aardolieafgeleiden minder gevraagd worden dan hun lichtere varianten. Visbreaking (viscositeitsreductie) is een milde vorm van thermisch kraken waardoor de viscositeit van zwaardere olie wordt verminderd (Olieh, Omole, & Osinowo, 1999). Hierdoor kan deze bijvoorbeeld gebruikt worden om te mengen in stookoliën. Op die manier dient minder van de waardevollere lichte olie gebruikt te worden om aan de minimumspecificaties hiervan te voldoen. Verder wordt het proces, in beperkte mate, gebruikt om zware voeding om te zetten in lichtere producten. Ook bij coking, ten slotte, wordt zware olie door middel van een thermisch proces omgezet in lichtere, meer bruikbare vormen (Telyashev, Obukhova, & Vezirov, 2006). Als nevenproduct worden hierbij cokes gevormd, waardoor het proces aan zijn naam komt (Speight, 2002).

Combinatieprocessen zijn een tweede soort processen die gebruikt worden bij de conversie van de afgescheiden aardoliefracties. De belangrijkste vormen die hierbij te onderscheiden vallen zijn alkylatie en polymerisatie. Beide processen combineren kleine molecules tot molecules met een groter moleculair gewicht en octaangetal. Op die manier bekomt men hoogwaardigere componenten die bijvoorbeeld kunnen dienen als benzineadditief (Gary & Handwerk, 2001).

Een derde soort conversieprocessen verandert de vorm van de molecules en wordt gebruikt om de eigenschappen van het product te verbeteren. Voorbeelden hiervan zijn isomerisatie- en reformeringsprocessen. Dit reformeren, dat zowel katalytisch als thermisch kan gebeuren, wordt

over het algemeen gebruikt om het octaangetal van de stof te laten stijgen om zo bijvoorbeeld betere benzine te bekomen (Petrov & Sharikov, 2007). Isomerisatie zorgt ervoor dat bepaalde alkanen, zoals butanen, pentanen en hexanen, worden omgevormd tot hun isomeren waardoor ze wederom een hoger octaangetal bekomen en hierdoor uitstekend dienen om als componenten in benzine gemengd te worden (Ono, 2003).

4.2.3 Afwerkingsprocessen

In deze laatste reeks van processen worden de petroleumproducten behandeld totdat ze klaar zijn voor het eindgebruik. De producten worden verbeterd en gestabiliseerd door een aantal processen waarin onzuiverheden worden verwijderd en bepaalde bijproducten (zoals was en asfalt) worden afgescheiden. Ten slotte worden de verschillende producten ook met elkaar vermengd om de juiste productspecificaties te bekomen. Zo kan bijvoorbeeld het product dat wordt bekomen uit het alkylatieproces toegevoegd worden aan benzine om een hoger octaangetal te bekomen (Speight, 2006).

Een overzicht van de verschillende raffinageprocessen kan worden teruggevonden in bijlage 2.

4.3 Producten afgeleid van aardolie

Zoals uit figuur 4.1 blijkt, kan uit aardolie een groot aantal verschillende producten worden afgeleid. Afhankelijk van de configuratie van de raffinaderij en het soort aardolie dat als input wordt gebruikt zullen andere producten geproduceerd kunnen worden. Zo zal lichte of 'zoete' aardolie, dat een zeer laag zwavelgehalte heeft, automatisch een grotere opbrengst van laagkokende producten zoals nafta, benzine, diesel en kerosine met zich meebrengen. Zware of 'zure' aardolie, met een hoger zwavelgehalte, levert op zijn beurt grotere opbrengsten van hoogkokende producten op. Deze kunnen dan hierna wel weer worden omgezet naar de lichtere en waardevollere producten via onder andere de verschillende kraakprocessen (Speight, 2006).

4.3.1 Petroleumgassen

Binnen deze categorie van producten die kunnen worden afgeleid worden uit aardolie kan men onderscheid maken tussen twee soorten gassen. Een eerste soort gassen komt vrij als een bijproduct tijdens raffinageprocessen zoals bijvoorbeeld visbreaking, coking en kraken (Speight, 2006). Bovendien komt het natuurlijk in aardolie opgelost gas ook vrij na distillatie. Dit soort gas wordt raffinagegas genoemd en is naast een belangrijke input voor de petrochemische industrie ook een energiebron voor de verschillende processen in de raffinaderij (Gary & Handwerk, 2001).

Hiernaast wordt uit aardolie ook bewust Liquified Petroleum Gas of LPG geproduceerd. De term LPG wordt gebruikt voor een aantal lichte koolwaterstoffen en hun mengsels die bij atmosferische druk in gasachtige toestand voorkomen, maar bij een iets hogere druk vloeibaar worden. De stoffen die het meest voor commercieel gebruik worden ingeschakeld zijn propaan en butaan, en een mengsel van de twee. Verder worden in mindere mate isobutaan, propyleen en butyleen gebruikt (Cawdery & Swoveland, 1989).

LPG kan voor tal van toepassingen gebruikt worden. Ten eerste zal het vanwege zijn mogelijkheid om warmte te produceren gebruikt worden in huiselijke en commerciële toepassingen. Zo is LPG bijvoorbeeld geschikt voor het verwarmen van huizen en bedrijfsruimtes en het bereiden van maaltijden. Ook in de industrie kan het vanwege zijn hitteafgeevende eigenschappen gebruikt worden, zoals bij het smeden en het lassen (Ali, El Ali, & Speight, 2005). Ten tweede kent LPG zijn toepassing binnen het transport. Het product kan gebruikt worden als hoogwaardige en milieuvriendelijke aandrijving van een heel aantal voertuigen zoals auto's, bussen, trucks en tractors (Bayraktar & Durgun, 2005). Ten slotte kan LPG ook aangewend worden in de chemische industrie. Hierbij kent het een direct gebruik, in de vorm van processen zoals het desasfalteren, en een gebruik als grondstof in de petrochemische industrie (Guthrie, 1960).

4.3.2 Nafta

Nafta, ook wel petroleumsolvent genoemd, is een vloeibaar aardolieproduct dat al sinds de geruime tijd bij de mensheid bekend is. Zo werd het onder andere gebruikt in het beruchte Griekse vuur, dat ook wel de voorloper van de napalm wordt genoemd (Speight, 2006). Chemisch gezien is het moeilijk om nafta te definiëren omdat de verschillende componenten (parafinen, naftenen, aromaten en olefinen) ervan in verschillende hoeveelheden en verhoudingen kunnen voorkomen. Voorts wordt het gekenmerkt door een vrij grote spreiding tussen het initiële- en het eindkookpunt. Hierdoor bestaan er een heel aantal verschillende soorten of gradaties van nafta. In het algemeen kunnen deze worden onderverdeeld in vier categorieën. Een eerste groep bestaat uit de zogenaamde 'special boiling point spirits', die koken tussen 30 en 150 graden Celsius. Een tweede groep bestaat uit de pure aromatische componenten zoals benzeen, toluen, xyleen en mengsels daarvan. De white spirits vormen een volgende categorie. Deze producten koken gemiddeld tussen 150 en 210°C. De hoogkokende fractie (160-325°C), ook wel zware nafta genoemd, is de laatste mogelijke soort nafta. Vaak zijn binnen deze grote categorieën nog eens verschillende gradaties op te meten (Speight, 2002).

Enkele karakteristieken van de nafta bepalen of het in aanmerking komt om gebruikt te worden voor een bepaalde toepassing. De meest voorname hieronder zijn de volatiliteit, de sterkte als solvent, de zuiverheid, de geur en de veiligheid en giftigheid (Wauquier, 1995). Dit laatste is van belang omdat nafta vaak in afgesloten ruimtes zoals fabriekshallen en huizen wordt gebruikt.

Omdat de verschillende soorten nafta op al deze karakteristieken kunnen verschillen kan voor een grote verscheidenheid aan toepassingen een geschikte petroleumsolvent worden gevonden. Hiernaast is het product overvloedig beschikbaar en is het goedkoper dan vergelijkbare, niet op aardolie gebaseerde, producten zoals terpentijn. Deze drie oorzaken geven aanleiding tot het wijdverspreid gebruik van nafta's in allerlei industrietakken en toepassingen (Speight, 2002)

Nafta wordt in de eerste plaats gebruikt als solvent en verdunner in een aantal producten zoals verf, boenmiddel en printinkt (Wauquier, 1995). Hiernaast ken het een belangrijke toepassing in de droogkuis. Verder is nafta ook een uitermate belangrijke voedingsbron in de petrochemische sector (Chang & Kuo, 2008). Daarnaast wordt het ook gebruikt voor de productie van hoogwaardige benzinecomponenten (Mostafazadeh & Rahimpour, 2009). Ten slotte kan men het product ook gebruiken als pesticide en insecticide (Guthrie, 1960).

4.3.3 Benzine

Benzine is een van de meest verbruikte en geproduceerde aardolieproducten ter wereld. In 2006 bedroeg het verbruik van aardolie bestemd voor de aanmaak van benzine maar liefst 21,645 miljoen vaten per dag. Dit komt overeen met ongeveer een kwart van de totale geproduceerde hoeveelheid afgeleide producten (International Energy Agency, 2008c). Het product dankt zijn grote populariteit aan het feit dat het wordt gebruikt als brandstof voor interne verbrandingsmotoren. Hiernaast wordt het ook in beperkte mate gebruikt als solvent voor oliën en vetten (Speight, 2006).

Benzine is voornamelijk opgebouwd uit een mengsel van koolwaterstoffen die tussen vier en twaalf koolstofatomen bevatten. In totaal kunnen er in de vloeistof enkele honderden types van deze koolwaterstoffen voorkomen die over het algemeen kunnen ingedeeld worden in drie categorieën: parafinen, olefinen, en aromaten (Guthrie, 1960). Het relatief aandeel van deze koolwaterstoffen in benzine verschilt naargelang de oorsprong van de ruwe aardolie, de gebruikte raffinageprocessen en de gewenste productspecificaties (Idem & Simanzhenkov, 2003).

De kwaliteit van benzine wordt in grote mate bepaald door zijn antiklopeigenschappen. Deze 'klop' ontstaat door een spontane en ongewenste ontbranding van de benzine (Armenante et al., 2007). Dit heeft tot gevolg dat er een zeer hoge plaatselijke druk ontstaat die heen en weer in de ontbrandingskamer kaatst. Dit veroorzaakt het kloppende geluid dat men in de auto kan horen. Naast deze hogere druk veroorzaakt de te vroege ontbranding ook excessieve temperaturen. Beide fenomenen geven aanleiding tot een verlies aan vermogen en efficiëntie. Als deze foutieve ontbranding lang genoeg aanhoudt en voldoende krachtig is kan er oververhitting van de motor en schade aan de mechanische onderdelen van de auto optreden (Guthrie, 1960).

De klopvastheid van benzine wordt aangegeven door het octaangetal. Om het octaangetal van een benzine te bepalen wordt deze vergeleken met de klopvastheid van een mengsel van iso-octaan en n-heptaan. Iso-octaan heeft een octaangetal van 100 en is zeer klopvast, terwijl n-heptaan een octaangetal van 0 en dus een lage weerstand tegen kloppen heeft (Cavadias & Machrafi, 2008). Een bepaalde benzine verkrijgt het octaangetal dat overeenkomt met het percentage iso-octaan dat voorkomt in het mengsel dat dezelfde klopvastheid heeft. Hoe hoger het octaangetal, hoe meer vermogen de motor zal kunnen ontwikkelen en hoe efficiënter dit zal gebeuren (Speight, 2006).

Het opdrijven van het octaangetal kan gebeuren door het toevoegen van additieven aan de benzine (Armenante et al., 2007). Vroeger werd hier vaak tetraëthyllood voor gebruikt. Nu is deze stof in vele landen verboden vanwege de giftige eigenschappen ervan en dient men dus een andere oplossing te gebruiken (Borzaev, Kapustin, & Karpov, 2007). Deze kan gevonden worden in een menging met andere componenten die zeer hoge octaangetallen hebben. Tegenwoordig wordt vaak gebruik gemaakt methyl-tert-butylether, ook wel MTBE genoemd. Dit product heeft over de jaren heen zijn nut in het verbeteren van de luchtkwaliteit bewezen. Het houdt daarentegen wel gevaren op het vlak van watervervuiling in en daarom komt ook deze octaanverbeteraar steeds meer onder vuur te liggen (Chisala, Lerner, & Tait, 2007).

Verder kunnen ook additieven worden toegevoegd om een heel aantal andere effecten te bekomen (Borzaev et al., 2007). Zo worden onder andere stoffen bijgevoegd die ijsvorming in de carburator en de brandstofleidingen voorkomen. Hiernaast worden antioxidanten toegevoegd die voorkomen dat bepaalde benzinecomponenten reageren met zuurstof in de lucht en zo peroxiden vormen. Deze peroxiden veroorzaken ondermeer een verlaging van het octaangetal van de benzine en tasten de plastic onderdelen van het brandstofsysteem aan. Ten slotte voegt men kleurstoffen toe om verschillende benzines van elkaar te kunnen onderscheiden (Wauquier, 1995).

Een variatie op benzine, naast motorbenzine, is de zogenaamde vliegtuigbenzine (avgas). Deze wordt gebruikt in kleinere vliegtuigen die worden aangedreven door pistonmotoren (Edwards, Harrison, Lander, & Maurice, 2001). Deze motoren genereren, volgens hetzelfde principe als de verbrandingsmotoren in auto's, een roterende beweging die de propeller van het vliegtuig aandrijft (Royal Dutch Shell, z.d.).

Niettegenstaande het feit dat deze pistonmotoren volgens hetzelfde principe werken als die in auto's, heeft vliegtuigbenzine toch een iets andere samenstelling (Wauquier, 1995). Het is namelijk noodzakelijk dat deze wordt aangepast aan de specifieke omstandigheden waarin de brandstof moet opereren. Vliegtuigbenzine dient te voldoen aan een aantal vereisten zoals een zo hoog mogelijk economisch verantwoord octaangetal, een maximale energie-inhoud per gewicht, een hoge chemische stabiliteit (waardoor langere stockage mogelijk is), een vriespunt rond -60°C en een kookpunt tussen 30 en 180°C . Bovendien dient men er voor te zorgen dat de gasdruk van

vliegtuigbenzine beperkt is om zo het ongewenst koken ervan binnen de opslagtanks te voorkomen. Dit gevaar kan optreden omdat de druk op vlieghoogte lager is dan die op de grond. Om dit te voorkomen moet men er voor zorgen dat er in vliegtuigbenzine geen gasachtige koolwaterstoffen, zoals butanen, voorkomen (Speight, 2006).

4.3.4 Straalvliegtuigbrandstof

Straalvliegtuigbrandstof is een brandstof die wordt gebruikt voor de aandrijving van vliegtuigen die gebruik maken van een turbine als aandrijvingsmechanisme (Wauquier, 1995). Hieronder vallen zowel vliegtuigen die gebruik maken van een straalmotor als van een turbopropeller (een soort straalmotor met een propeller op bevestigd). Dit laatste systeem is vooral effectief bij lage snelheden en wordt dus gebruikt bij kleine passagiersvliegtuigen en vrachtvliegtuigen terwijl de straalmotor wordt aangewend bij de meeste commerciële lijnvluchten en militaire toepassingen (Guthrie, 1960).

Binnen de productgroep straalvliegtuigbrandstof bestaan er twee grote onderverdelingen (Gary & Handwerk, 2001). Het kerosinetype straalvliegtuigbrandstof is een aangepaste versie van gewone kerosine en beide producten hebben dan ook dezelfde distillatietemperaturen. Aan deze kerosine worden wel bepaalde speciale eisen opgelegd door de International Air Transport Association (IATA). Het benzinetype straalvliegtuigbrandstof, daarentegen, is een product dat wordt bekomen door het mengen van kerosine en benzine of nafta (Speight, 2006). In het algemeen wordt straalvliegtuigbrandstof zo samengesteld dat het gehalte aromaten niet meer dan 25 volumeprocent bedraagt (Cathonnet & Dagaut, 2006). Deze aromaten, die in ruime mate in benzine aanwezig zijn, kunnen er namelijk toe leiden dat bepaalde componenten in het brandstofsysteem, zoals sluitingen, worden aangetast (Speight, 2002)

Omdat deze brandstof gebruikt wordt in vliegtuigen worden er bepaalde eisen aan gesteld die strenger zijn dan dat bij andere brandstoffen het geval is. Allereerst is het belangrijk dat straalvliegtuigbrandstof een hoge energiedichtheid bezit (Cathonnet & Dagaut, 2006). Verder dient ze zuiver te verbranden en dus geen schadelijke stoffen in het verbrandingsmechanisme achter te laten. Ook moet ze vloeibaar en vrij van wasdeeltjes blijven bij de lage temperaturen die het op hoge hoogte zal ondergaan (Wauquier, 1995). Verder mogen er ook geen waterdeeltjes in de brandstof aanwezig zijn omdat deze het brandstofsysteem kunnen blokkeren door de vorming van ijsdeeltjes. Vaak wordt aan brandstof voor militaire vliegtuigen, zoals straaljagers, nog strengere eisen gesteld. Om hier aan te kunnen voldoen zijn dan ook een heel aantal speciale additieven ontwikkeld (Edwards et al., 2001).

4.3.5 Kerosine

Kerosine, ook wel paraffineolie genoemd, is een kleurloze of lichtgele ontvlambare vloeistof. Het was veruit het belangrijkste raffinageproduct bij de aanvang van de olie-industrie in de 19^e eeuw, maar ondertussen heeft het aan belang moeten inboeten. Kerosine kan gebruikt worden voor een aantal toepassingen. Het oudste gebruik van het product is terug te vinden in de verbranding ervan met als doel een lichtbron te creëren. Hiervoor dient men een zogenaamde kerosinelamp te gebruiken (Guthrie, 1960). Voor dit gebruik dient kerosine zo weinig mogelijk aromaten en onverzadigde koolwaterstoffen te bevatten omdat deze bij gebruik rook zouden doen ontstaan. Ook zwavelsporen dienen verwijderd te worden omdat die bij verbranding giftige zwaveloxides vormen (Speight, 2002).

Verder wordt kerosine gebruikt bij andere huiselijke toepassingen zoals verwarmen en koken (Binedell, Diab, Hounsoume, & Muller, 2003). Ook kent het een beperkt gebruik als solvent voor vetten en als pesticide (Speight, 2006). Een zeer belangrijke toepassing, ten slotte, kan men terugvinden in het gebruik ervan als brandstof of brandstofcomponent voor vliegtuigaandrijving (Allen, Armstrong, & Denning, 1997)

4.3.6 Stookoliën

Binnen deze categorie bestaat er een grote diversiteit aan producten en benamingen. Allereerst kan stookolie worden opgedeeld in residuele en gedistilleerde stookolie. Gedistilleerde stookolie is stookolie die bekomen wordt tijdens het distillatieproces en heeft dus een afgebakend kookgebied. Het bevat hiernaast geen hoogkokende- of asfaltfracties. Residuele stookolie, daarentegen, is stookolie die bekomen wordt uit het residu dat overblijft na distillatie en kraakprocessen (Gary & Handwerk, 2001). Deze olie wordt gekenmerkt door een grote dichtheid en is dus zwaarder dan zijn tegenhanger. Beide termen verliezen overigens stilaan hun betekenis omdat tegenwoordig de stookoliën gemaakt worden voor specifieke toepassingen waarvoor zowel residuele en gedistilleerde stookoliën als mengsels van de twee gebruikt wordt (Speight, 2002).

Daarom is het nuttiger om stookolie op een andere manier in te delen, met name op basis van de toepassing waarvoor het gebruikt wordt. Hierbij kan men ten eerste de huishoudelijke stookolie of huisbrandolie onderscheiden. Deze kan gebruikt worden in allerlei verwarmingstoepassingen zoals stoven en centrale verwarmingssystemen (Axley, Brandt-Rauf, Kaplan, Sewell, & Shen, 1993). Binnen de stookoliën kan men vervolgens ook dieselolie onderscheiden. Dit product kan gebruikt worden als verwarmingsbrandstof in industriële en commerciële omgevingen, maar ook als brandstof in dieselmotoren. Vanwege de belangrijkheid van deze laatste toepassing zal dit product apart behandeld worden. Zware stookolie, ten slotte, bestaat uit een mengeling van verschillende componenten. Het bestaat uit de zwaarste oliën, waar vaak lichtere soorten aan worden

toegevoegd om de viscositeit ervan te verbeteren. Dit soort stookolie wordt gebruikt in industriële toepassingen die gebruik maken van hitteopwekking zoals stoomboilers. Deze kan men bijvoorbeeld terugvinden in elektriciteitscentrales (Danilov, Mitusova, Okina, & Pugach, 2003). Ook wordt het, onder de benaming bunkerolie, gebruikt in de scheepvaart (Speight, 2006). De zware stookolie is onder normale temperaturen zeer stroperig en kan zelfs een halfvaste toestand aannemen. Daarom dient deze eerst verhit te worden tot een vloeibare toestand vooraleer het kan verstoekt worden (Lee et al., 2007). Omdat zware stookolie een groter aantal vervuilende stoffen bevat, brengt het gebruik ervan grotere schade toe aan het milieu dan dat bij andere brandstoffen het geval is (Barreras, Ferreira, García, Lincheta, & Lozano, 2009).

4.3.7 Diesel

Diesel behoort tot de klasse van de middendistillaten en de stookoliën. Oorspronkelijk werd diesel uitsluitend rechtstreeks via distillatie geproduceerd maar vanwege een hoge vraag wordt tegenwoordig ook gekraakt distillaat gebruikt om de beschikbare hoeveelheid ervan te vergroten. Diesel komt in sterke mate overeen met huishoudelijke stookolie, maar bevat een lagere aromatische inhoud vanwege de negatieve invloed hiervan op het cetaangetal van de brandstof (Speight, 2006).

Diesels kunnen voor een aantal doeleinden gebruikt worden. De exacte samenstelling van diesel zal dan ook, omwille van specifieke vereisten, verschillen naargelang de toepassing. Het meest bekende gebruik van diesel ligt in de aandrijving van traditionele gemotoriseerde voertuigen zoals auto's, vrachtwagens en bussen. Ook landbouwvoertuigen en tal van zware machines zoals bulldozers maken er gebruik van. In een dieselmotor wordt de lucht in de cilinder onder hoge temperatuur en druk gebracht (Wauquier, 1995). Vervolgens wordt de diesel in het systeem geïnjecteerd waarna deze omwille van de heersende omstandigheden spontaan zal ontbranden. Er wordt dus, in tegenstelling tot bij de benzinemotor, geen vonk aan de brandstof toegevoegd. Verder kan men ook voor de aandrijving van treinen en boten dieselmotoren gebruiken. Ten slotte wordt diesel ook aangewend in stationaire motoren. Hierbij wordt het vooral gebruikt voor de opwekking van elektriciteit, zowel via kleine generatoren als grootschalige installaties (Speight, 2002)

Het cetaangetal van een diesel bepaalt de verbrandingskwaliteit van de brandstof, net zoals het octaangehalte dit doet voor benzine (Knothe, Matheaus, & Ryan, 2003). Dit cetaangetal is een maatstaf van de kracht waarmee diesel wordt ontbrand tijdens de compressie in de cilinder. Hoe hoger dit getal, hoe korter de ontbrandingsvertraging zal zijn. Deze ontbrandingsvertraging is het verschil in tijd tussen de injectie van de diesel en het ontvlammen ervan (Di et al., 2008). Hoe korter deze periode is, hoe beter de verbranding zal zijn. Hierdoor zal de motor makkelijker koud

starten, minder geluid bij de ontbranding produceren, sneller opwarmen en minder rook en vervuilende stoffen uitstoten (Speight, 2006).

Het cetaangetal van een diesel wordt bepaald aan de hand van twee referentiewaarden. Enerzijds wordt hiervoor n-hexadecaan, met een cetaangetal van honderd, gebruikt dat een zeer korte ontbrandingsvertraging heeft. Anderzijds gebruikt men heptamethylnonaan, met een cetaangetal van vijftien als tweede referentiestof (Knothe et al., 2003). De beschouwde diesel wordt vervolgens vergeleken met een mengsel van deze twee stoffen dat dezelfde ontbrandingsvertraging heeft. Het cetaangetal wordt dan bepaald door het percentage cetaan van het mengsel op te tellen bij het product van 0,15 en het aanwezige percentage heptamethylnonaan. Diesels die gebruikt worden in het wegverkeer hebben gemiddeld genomen een cetaangetal tussen 45 en 55 (Speight, 2002)

Ook aan diesel kunnen additieven worden toegevoegd om de prestaties ervan te verbeteren. Zo kunnen bijvoorbeeld alkylnitraten worden toegevoegd om het cetaangetal en dus de kwaliteit van de ontbranding te verhogen (Churzin, Danilov, Kovalev, & Mitusova, 2004). Verder voegt men vloeipuntverlagers toe om de prestaties van de brandstof bij lagere temperaturen te verbeteren. Tijdens de winter of in zeer koude streken zouden anders problemen kunnen optreden. Verder worden er ook additieven toegevoegd die de uitstoot van uitlaatgassen verminderen (Beatrice, Frusteri, Guido, & Spadaro, 2007). Ook voegt men kleurstoffen toe om de verschillende soorten diesels, die vaak anders belast worden, te kunnen onderscheiden. Ten slotte kunnen ook antioxidanten en bezinkselverwijderaars worden gebruikt om te voorkomen dat leidingen en filters verstopt geraken (Speight, 2002).

4.3.8 Smeeroliën

Smeermiddelen worden reeds sinds de begindagen van de petroleumindustrie gewonnen uit aardolie. Het product werd toen gevormd als bijproduct tijdens de productie van aardoliewassen. Het duurde echter vele jaren, tot de opkomst van de zware industrie en de daarmee gepaard gaande machines, vooraleer smeeroliën op basis van aardolie op grote schaal gebruikt werden. Tot dan gaf men vaak de voorkeur aan plantaardige en dierlijke oliën (Speight, 2002). Men kan smeeroliën onderscheiden van de andere fracties van ruwe aardolie aan de hand van zijn hoog kookpunt en zijn hoge viscositeit. De koolwaterstoffen die er in voorkomen bestaan uit moleculen die een groot aantal (>20) koolstofatomen bevatten.

Smeermiddelen zorgen ervoor dat het contact tussen twee oppervlakken verminderd wordt door het aanbrengen een dunne film die als scheidingslaag optreedt (Speight, 2002). Het gebruik van smeermiddelen brengt een groot aantal voordelen met zich mee en daarom worden ze ook zo vaak gebruikt in tal van toepassingen. Ten eerste zorgen smeermiddelen voor een lagere wrijving. Hierdoor bespaart men energie en wordt slijtage voorkomen. Het voorkomen van slijtage is ook het

tweede voordeel dat kan worden aangehaald. Smeermiddelen verminderen niet alleen mechanische slijtage, zoals erosie door wrijving, maar ook chemische slijtage. Chemische slijtage ontstaat door corrosie veroorzaakt door in de productie vrijgekomen zuren en water. Vervolgens zorgen smeermiddelen ook voor koeling van de mechanische componenten omdat ze helpen in het afvoeren van de hitte en bovendien de geproduceerde hoeveelheid hitte verminderen. Ten slotte houden smeermiddelen de mechanische componenten zuiver door afzettingen van onzuiverheden te voorkomen (Speight, 2006).

Vele voordelen verbonden aan smeermiddelen kunnen enkel bereikt worden door het toevoegen van bepaalde additieven (Kornev, Ostrikov, & Tupotilov, 2008). Deze synthetisch stoffen, die de eigenschappen van het smeermiddel optimaliseren voor bepaalde toepassingen, kunnen tot 25 procent van het product uitmaken. Zo kan men bijvoorbeeld een substantie toevoegen die er voor zorgt dat de smeerolie goed vloeibaar blijft bij lage temperaturen. Verder kan men ook antioxidant toevoegen waardoor het smeermiddel minder snel zal oxideren en dus ook minder snel moet vervangen worden (Gary & Handwerk, 2001). Ook kan men detergenten, die vermijden dat onzuiverheden zich afzetten op de mechanische onderdelen, gebruiken. Een andere belangrijk voorbeeld is het toevoegen van middelen die de viscositeit verbeteren (Wauquier, 1995).

4.3.9 Andere afgeleide oliën

Naast de smeeroliën behoort nog een reeks andere oliën tot de hoogkokende fractie van aardolie. Een eerste product dat hierbij kan vermeld worden is de minerale of witte olie. Deze kan verder onderverdeeld worden in twee klassen: de medicinale olie en de technische olie (Wauquier, 1995). Medicinale olie is een hooggeraffineerd product waaraan strenge eisen worden gesteld. Dit is zeker het geval indien het bestemd is voor de farmaceutische sector. Meerbepaald dient deze medicinale witte olie inert te zijn en vrij van giftige stoffen. Het wordt onder andere gebruikt in de bereiding van laxemiddelen en als smeermiddel van machines in de voedingsindustrie (Speight, 2006). Aan technische witte olie worden vaak minder strenge eisen gesteld omdat deze minder direct gevaar kunnen opleveren voor de volksgezondheid. Dit soort olie wordt onder andere gebruikt in de cosmetische bereiding van bijvoorbeeld haarcrème, de textielverwerking en de plasticindustrie (Wauquier, 1995).

Ook isolerende olie hoort thuis binnen de hoogkokende fractie van aardolie. Deze olie wordt gebruikt om elektrische isolatie van onder andere transformators, zekeringen en bekabeling te verzorgen (Speight, 2002). Ten slotte hebben bepaalde afgeleide oliën een opmerkelijke dodende kracht ten opzichte van verschillende soorten insecten. Voor andere toepassingen, waarvoor het niet dodelijk genoeg is, kan het dienen als drager van krachtigere giften (Guthrie, 1960).

4.3.10 Petroleumwas

Chemisch gezien is petroleumwas een mengsel van verzadigde alifatische (zonder ringstructuur) koolwaterstoffen. Het product heeft een kristallijne structuur en is zowel doorzichtig als smaak- en kleurloos. Petroleumwas wordt gekenmerkt door zijn vaste toestand bij kamertemperatuur en zijn lage viscositeit wanneer het wordt gesmolten (Speight, 2006). Wassen kunnen ook van dierlijk en plantaardig materiaal gemaakt worden. Omdat deze echter duurder zijn en een verschillende chemische structuur kunnen hebben wordt tegenwoordig vooral gebruik gemaakt van petroleumwassen. Petroleumwassen zijn niet alleen goedkoop maar ook zeer zuiver, chemisch relatief inert en vrij van geur en smaak. Een andere zeer belangrijke kenmerk van het product is de bestandheid ervan tegen water en vocht (Gustafson, Petersson, & Stading, 2008).

Vanwege deze eigenschappen worden petroleumwassen vaak gebruikt in de voedings-, cosmetische-, verpakings- en farmaceutische industrie (Tennant, 2004). In de voedingsindustrie wordt het product aangewend om voeding op een goedkope manier sterker en bestand tegen vocht te maken, maar ook om het uiterlijk ervan te verbeteren. Zo werd petroleumwas bijvoorbeeld in deze industrie voor het eerst gebruikt door Amerikaanse fruittelers die een laagje ervan aanbrachten op citrusvruchten om hen beter te beschermen tijdens het transport (Guthrie, 1960). Verder kent het product ook nog toepassingen als isolator in elektrische apparaten, in de productie van kaarsen en papier, in de textielindustrie en als component in de productie van rubber (Speight, 2006). Ook kan het gebruikt worden als ingrediënt in boenmiddel en is het omwille van zijn plasticiteit bruikbaar voor het modelleren en maken van replica's, bijvoorbeeld door tandartsen (Speight, 2002).

4.3.11 Smeervetten

Smeervet is een halfvaste stof die bestaat uit een smeervloeistof waaraan een verdikker is toegevoegd waardoor het smeermiddel beter op de juiste plaats kan worden gehouden (Delgado, Franco, Gallegos, Moreno, & Valencia, 2006). In feite is smeervet dus smeerolie waaraan een bepaalde stof is toegevoegd die het tot een gelachtige substantie maakt (Wauquier, 1995). Deze verdikker is meestal een of ander soort zeep. Deze zeep wordt chemisch aangemaakt door het combineren van een metaalhydroxide met een vet of een vetzuur (Speight, 2002). Zepen die vaak worden gebruikt bij het fabriceren van smeervet zijn aluminium-, calcium-, barium-, natrium- en lithiumzepen (Franco, Gallegos, Martín-Alfonso, Sánchez, & Valencia, 2007).

Het metaal in de zeep heeft een belangrijk effect op de eigenschappen ervan. Zo vormen calciumzepen smeervetten die bestand zijn tegen water, maar niet aan temperaturen van hoger dan 95°C mogen worden blootgesteld. Lithiumzepen kunnen daarentegen bij zowel hoge als lage temperaturen gebruikt worden (Speight, 2006). Verder worden ook aan smeervet bepaalde

additieven toegevoegd om het de gewenste eigenschappen te geven (Delgado et al.). Deze komen vaak overeen met additieven die ook aan smeerolie worden toegevoegd zoals bijvoorbeeld corrosie- en oxidatieremmers.

Smeervetten hebben voornamelijk dezelfde functie als smeeroliën. Het grote voordeel van de vetten is echter dat deze gemakkelijker op de plaats van toepassing blijven zitten en dat ze langer goed blijven. Oliën daarentegen zijn moeilijk op één plaats aan te brengen en moeten vaker worden bijgevuld. Verder sluiten smeervetten het gesmeerde onderdeel af van onzuiverheden van buitenaf. Ook vermijden ze verspilling en vervuiling door lekkage of druppelen. Bovendien zullen vetten altijd zorgen voor enige smering, zelfs als er gedurende lange tijd geen aandacht aan het onderhoud gegeven is. Verder zijn vetten te verkiezen bij extreme werkingscondities zoals hoge temperaturen en drukken. Anderzijds bieden oliën meer verkoeling. Ook is smeerolie goedkoper dan vet, al dient men hier wel een afweging te maken omdat men voor eenzelfde smering meer olie dan vet nodig heeft (Guthrie, 1960).

4.3.12 Asfalt

Petroleumasfalt kan gedefinieerd worden als een donkerbruin tot zwart cementachtig materiaal dat voorkomt als vaste of halfvaste stof en waarin het grootste bestanddeel uit de natuur of petroleumraffinage bekomen bitumen is (Speight, 2002). Het in de natuur voorkomende asfalt is een overblijfsel van ruwe aardolie die naar het aardoppervlak is gesijpeld en waarvan de lichtere bestanddelen over vele jaren heen afgebroken zijn. In de raffinage is asfalt het product dat overblijft nadat alle andere producten uit de aardolie zijn onttrokken. Het kan zelf niet worden gedistilleerd, zelfs niet in vacuüm, omdat de temperaturen die hiervoor nodig zijn leiden tot de vorming van cokes (Speight, 2006). Ook door het afwerkingproces waarin bepaalde producten worden gedeasfalteerd met propaan, wordt asfalt als bijproduct afgescheiden (Dolmatov, 2006).

Het gebruik van asfalt dateert reeds van de oudheid. Toen werd het bijvoorbeeld gebruikt als mortel in stenen gebouwen, bij de aanleg van wegen en vanwege zijn waterafstotende eigenschappen (Guthrie, 1960). Tegenwoordig kent het zijn belangrijkste toepassing in de constructie van allerlei wegen (Elliot, Langer, & Nadel, 2006). Ook voor landingsbanen wordt vaak van asfalt gebruik gemaakt. Verder wordt het toegepast bij het aanleggen van dakbedekking. Ten slotte wordt petroleumasfalt ook in mindere mate gebruikt in de productie van onder andere verf, vernis, isolatie en roestwerende middelen (Wauquier, 1995).

4.3.13 Cokes

Cokes is het residu dat overblijft na de destructieve distillatie van aardolie. De grijze tot zwarte vaste stof wordt gekenmerkt door een zeer hoge concentratie aan koolstof (90-95 %) en een honingraatachtige structuur (Speight, 2006).

Aardoliecokes wordt voor verscheidene toepassingen gebruikt. Zo wordt het bij de ijzer- en staalindustrie gebruikt in de hoogovens. Verder kan men er ook chemicaliën, met name carbides, uit produceren. Voorbeelden hiervan zijn silicium- en calciumcarbide (Guthrie, 1960). Hiernaast kan men het ook gebruiken ter verwarming en voor het opwekken van elektriciteit (Bryers, 1995). Een zeer belangrijk gebruik van aardoliecokes, ten slotte, kan men terugvinden in de productie van koolstofelektroden die onder andere gebruikt worden bij de productie van aluminium (Telyashev et al., 2006). Hiervoor dienen de cokes eerst gecalcineerd te worden zodat deze van onzuiverheden, zoals zwavel, ontdaan worden (Choi & Lee, 2000).

4.3.14 Petrochemicaliën

4.3.14.1 Inleiding

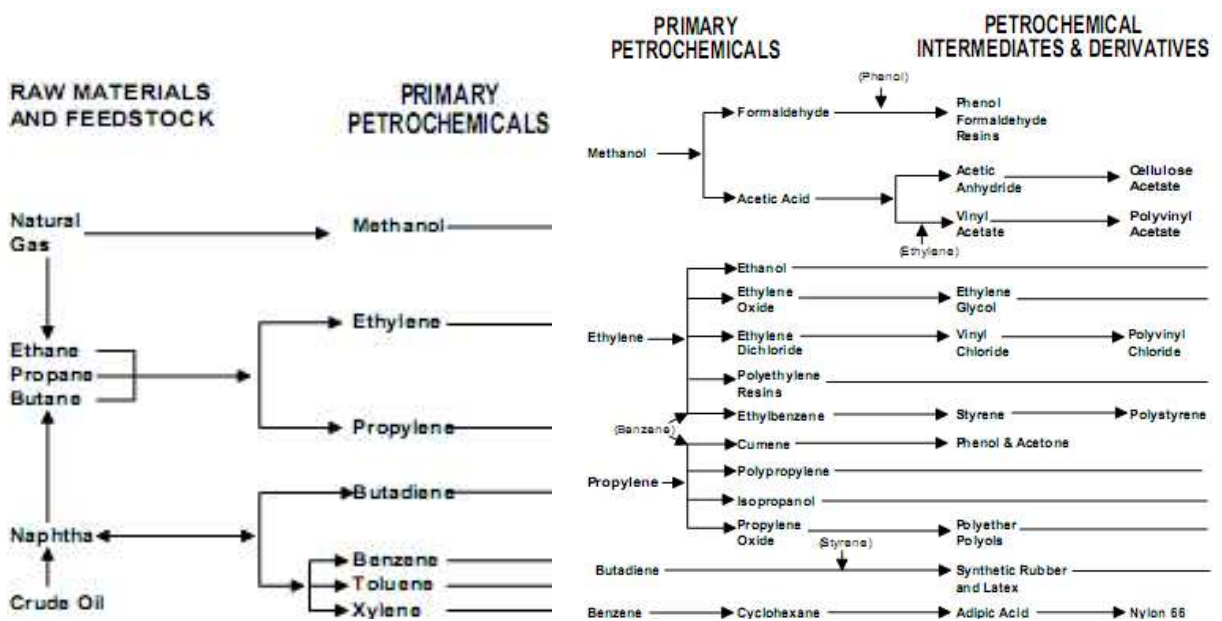
Petrochemicaliën kunnen gedefinieerd worden als chemische verbindingen of -elementen gewonnen uit aardolie of aardgas of volledig of gedeeltelijk afgeleid uit de koolwaterstoffen hierin vervat, die bedoeld zijn voor chemische markten (Guthrie, 1960). Door de definitie op deze manier te formuleren worden alle relevante chemicaliën inbegrepen (zowel de componenten die natuurlijk in aardolie en -gas voorkomen als degenen die er door chemische processen van worden afgeleid) en producten die niet tot de categorie van petrochemicaliën behoren weggelaten (bijvoorbeeld andere aardolieproducten zoals benzine maar ook butaan gebruikt als brandstof).

Vaak kunnen chemicaliën die uit petrochemische processen worden geproduceerd ook van andere bronnen worden afgeleid. Zo kan ethanol bijvoorbeeld zowel uit aardolie als uit sommige plantensoorten geproduceerd worden en kan benzeen ook uit steenkool, overigens vaak de bron van chemicaliën vóór het gebruik van aardolie, gefabriceerd worden (Speight, 2006). Toch worden deze chemicaliën voornamelijk op basis van aardolie afgeleid vanwege de (vooralsnog) grote beschikbaarheid van de grondstof, de relatieve simpliciteit van de benodigde processen en de relatief lage kostprijs (Ali et al., 2005). Wanneer de wereld het punt van een piekende aardolieproductie nadert en overschrijdt zou dit dus ook voor deze industrie grote gevolgen kunnen hebben omwille van een lager aanbod en naar verwachting hogere prijs van aardolie (Leder & Shapiro, 2008).

Petrochemicaliën kunnen gemaakt worden van quasi elke distilleerbare fractie van aardolie. Hoewel men ook van de zwaardere fracties chemicaliën maakt, wordt de overgrote meerderheid toch geproduceerd uit de lichtere koolwaterstoffen. Het gros van de chemische afgeleiden wordt dan ook bekomen uit raffinagegassen, nafta en aardgas. In het algemeen kan men petrochemische producten onderverdelen in enerzijds primaire petrochemicaliën en anderzijds intermediaire producten en derivaten (Lee et al., 2007). Primaire petrochemische producten zijn chemische componenten die direct kunnen worden afgeleid uit de verschillende voedingsbronnen. Zoals op

figuur 4.2 grafisch wordt weergegeven kan men binnen deze primaire producten drie groepen onderscheiden: de olefinen (waarvan de belangrijkste ethyleen, propyleen en butadien zijn), de aromaten (benzeen, toluen en xyleen) en methanol (Speight, 2006). Hiernaast produceert men ook enkele anorganische chemische producten uit aardolie (Hatch & Matar, 2001).

Intermediaire producten worden bekomen door chemische conversie van primaire chemicaliën en worden vaak gebruikt in de productie van afgewerkte producten. Deze derivaten kunnen zowel rechtstreeks uit primaire producten als via een tussenproduct geproduceerd worden (The Canadian Chemical Producers' Association, 1994). Het rechtergedeelte van figuur 4.2 geeft de relatie tussen de primaire producten enerzijds en de intermediaire producten en derivaten anderzijds weer, alsook een beperkte opsomming van enkele derivaten.



Figuur 4.2: Primaire en intermediaire petrochemicaliën (The Canadian Chemical Producers' Association, 1994, p. 16 & 20)

4.3.14.2 Chemicaliën uit olefinen

Olefinen zijn de basiselementen voor een groot aantal chemische afgeleiden. Men kan deze stoffen onttrekken uit raffinagegassen en bij het kraken van aardolieproducten zoals nafta en residuen (Speight, 2006). Vanwege de dubbele binding van koolstofatomen die deze categorie koolwaterstoffen kenmerkt zijn ze reactiever dan hun verzadigde tegenhangers (Guthrie, 1960). Binnen de olefinen zijn ethyleen, propyleen en butadien de belangrijkste producten. Hiernaast worden ook butenen en isobutyleen gebruikt in de productie van petrochemicaliën (Jones & Pujadó, 2006).

Ethyleen

Ethyleen is qua structuur de eenvoudigste koolwaterstof binnen de familie van de olefinen. Het is een zeer actief product dat gemakkelijk bindingen aangaat met andere chemische stoffen. Omdat het bovendien ook nog vrij goedkoop is, worden van ethyleen meer petrochemische producten geproduceerd dan van welk ander product dan ook (Hatch & Matar, 2001). De voornaamste intermediaire producten die men uit ethyleen kan maken zijn ethylbenzeen, polyethyleen, ethyleenoxide, ethylalcohol, ethyleendichloride en acetaldehyde (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005).

Ethylbenzeen ontstaat door een reactie van benzeen met ethyleen en dient vooral in de aanmaak van styreen (Burdick & Leffler, 1990). Dit styreen wordt vervolgens gebruikt in de productie van een aantal belangrijke chemische producten waarmee de consument dagdagelijks in contact komt. Zo wordt polystyreen gebruikt in plastics die men bijvoorbeeld kan terugvinden in plastic drinkbekers, speelgoed en kantoor materiaal (The Canadian Chemical Producers' Association, 1994). ABS (acrylonitril-butadieen-styreen) en SAN (styreen-acrylonitril), vervolgens, zijn sterke, impact- en hittebestendige plastics die gebruikt worden in toepassingen zoals bagagekoffers, auto-onderdelen en sporthelmen (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005). Ook onverzadigde polyesterharsen kunnen uit styreen vervaardigd worden. Dit product wordt onder andere gebruikt in de constructie van boten, auto's en windmolens. De belangrijkste toepassingen van styreen bevindt zich echter in de vorming van styreen-butadieen rubber (SBR). Vanwege zijn goede slijtageweerstand wordt dit synthetische rubber, naast in toepassingen zoals vloerbedekking en schoeisel, vooral intensief gebruikt in de productie van banden van auto's en vrachtwagens (Baldi, Bernardi, & Grieco, 2008).

Polyethyleen is een zeer belangrijk chemisch product dat wordt gevormd door de polymerisatie van ethyleen. Dit thermoplastic kent omwille van zijn isolerende eigenschappen, een goede weerstand tegen chemicaliën en vochtigheid, sterkte, vervormbaarheid en lichtheid een wijdverspreid gebruik. (Speight, 2006). Zo maakt men er onder andere verpakkingsmiddelen zoals plastic zakken, flessen en doorzichtige film van. Ook afvoerbuizen, kabels, speelgoed en een heel aantal andere producten worden geproduceerd uit polyethyleen (The Canadian Chemical Producers' Association, 1994).

Een derde afgeleide van ethyleen, ethyleenoxide, is vooral bekend vanwege zijn rol in de productie van ethyleenglycol. Dit product wordt gebruikt in antivriesmiddel, remvloeistof maar vooral in de productie van polyethyleen tereftalaat, of kortweg PET (Burdick & Leffler, 1990). Dit veelzijdige en vaak gebruikte product kent zijn toepassing in onder andere plastic flessen maar ook polyestervezels voor gebruik in verpakking, transportbanden, touwen en kleding (Achilias & Karayannidis, 2007). Ethyleenoxide wordt verder gebruikt in de productie van een aantal ethanolamine die onder andere gebruikt worden in detergents, shampoo, agrochemicaliën en

cementverbeteraars. Hiernaast wordt het product ook in een aantal andere afgeleiden zoals solventen, weekmakers en poetsmiddelen verwerkt (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005).

Ethyleendichloride wordt gebruikt in de aanmaak van enkele ethyleenafgeleiden die voornamelijk dienst doen als solventen, maar is vooral gekend als voorloper van vinylchloride. Dit product wordt op zijn beurt gebruikt in de productie van polyvinylchloride, vaak kortweg PVC genoemd (Emura & Saeki, 2002). PVC is één van de meest gebruikte plastics ter wereld en kent dan ook tal van toepassingen in onder andere de medische sector (handschoenen, catheters, bloedzakjes), de bouw, auto's, speelgoed, verpakkingen en nog veel meer. PVC bevat een aantal eigenschappen waardoor het in deze sectoren zo bruikbaar is. Zo is PVC veilig, chemisch stabiel en inert waardoor het zich uitstekend leent voor gebruik in de medische sector. Verder is het product licht, stevig en goedkoop waardoor sectoren zoals de bouw en de autoconstructie het zo interessant vinden (The European Council of Vinyl Manufacturers, z.d.).

Aceetaldehyde wordt voornamelijk gebruikt in de synthese van acetaatzuur. Dit product dient vervolgens in de bereiding van verschillende esters en, via het tussenproduct vinylacetaat, plastics (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005).

Ethylalcohol, beter bekend onder de naam ethanol, is een laatste belangrijk product dat wordt afgeleid uit ethyleen. Het product wordt gebruikt als brandstof voor transportvoertuigen en als benzineadditief (Guimarães et al., 2009). Hiernaast dient het ook als tussenproduct in een heel aantal toepassingen. Zo wordt het bijvoorbeeld gebruikt in de productie van solventen (Hatch & Matar, 2001). Verder worden er ook ethyleenamines van gemaakt die gebruikt worden in detergents, zepen, farmaceutische producten en papier. Een ander gebruik van ethanol is de productie van ethylacrylaat. Dit wordt verwerkt in onder andere synthetisch rubber, plakstoffen, boenmiddel en latexverven (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005).

Propyleen

Propyleen wordt ook wel de kroonprins van de petrochemicaliën genoemd en is na ethyleen het product waarvan het grootste aantal chemische substanties worden afgeleid. De voornaamste intermediare producten die men uit propyleen kan produceren zijn acrylzuur, acrylonitril, polypropyleen, propyleenoxide, butyraldehyde, cumeen en isopropanol.

Acrylzuur wordt enerzijds gebruikt voor de aanmaak van acrylesters. Dit product is een filmvormende component in producten zoals verven, plakstoffen en plastics (Hatch & Matar, 2001). Anderzijds dient acrylzuur ook voor de productie van polyacrylaat. Deze polymeer heeft een superabsorberend vermogen (tot enkele honderden malen zijn eigen gewicht) en kan men dan ook terugvinden in onder andere luiers en maandverbanden (Chen & Zhao, 1999).

Acrylonitril is een tweede intermediair dat men kan afleiden uit propyleen. Het wordt gebruikt in de aanmaak van een aantal plastics zoals ABS en SAN. Een ander mogelijk afgeleid product is nitril-butadiëen-rubber (NBR). Vanwege de weerstand van het product tegen vloeibare koolwaterstoffen wordt dit synthetisch rubber vaak gebruikt in de auto-industrie, bijvoorbeeld in sluitingen en brandstoftanks en –slangen (Chazeau et al., 2005). Ook bij industriële uitrusting en machines zoals hydraulische systemen wordt van NBR gebruik gemaakt. Een laatste belangrijke afgeleide van acrylonitril kan men terugvinden in acrylvezels voor gebruik in de textielindustrie (Burdick & Leffler, 1990).

Polypropyleen ontstaat door de polymerisatie van propyleen (Speight, 2006). Het product behoort samen met polyethyleen tot de categorie van de polyolefinen. Polypropyleen is een zeer licht product dat bovendien goed impact- en slijtagebestendig is. Verder is het niet giftig en goed bestand tegen chemische invloeden. Omwille van deze eigenschappen wordt het product op grote schaal gebruikt. Het kent onder andere zijn toepassing in voedselverpakkingen, medisch materiaal, tuinmeubels, autocomponenten en synthetische vezels (Association of Plastics Manufacturers, z.d.)

Propyleenoxide is een ander intermediair dat men kan afleiden van propyleen. Op zijn beurt kan men hieruit een aantal producten ontwikkelen. Hiervan zijn polyolen, die gebruikt worden in de fabricage van polyurethanen een belangrijk voorbeeld. Polyurethaan kent zijn toepassing in de aanmaak van het schuim dat onder andere gebruikt wordt in isolatie, matrassen, autozetels, meubels en koelkasten (Hatch & Matar, 2001). Ook in allerlei sportmaterialen zoals rolschaatswielen, synthetische atletiekpistes en loopschoenen wordt het gebruikt. Verder wordt een heel aantal producten die afgeleid worden van propyleenoxide gebruikt als solventen. Het belangrijkste voorbeeld hiervan is monopropyleenglycol. Naast zijn gebruik als solvent in de farmaceutische en cosmetische industrie wordt het ook ingezet als tussenproduct in de vorming van polyesterharsen (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005).

Butyraldehyde wordt gebruikt in de productie van een aantal producten (zoals isobutanol) die vooral dienen in de aanmaak van solventen. Een van deze producten, ethylhexanol, wordt hiernaast ook nog gebruikt als weekmaker in PVC (Hatch & Matar, 2001).

Cumeen wordt gevormd door de reactie van propyleen en benzeen (Meyers, 2004). Deze stof wordt aangewend bij de aanmaak van geneesmiddelen zoals aspirine en penicilline maar ook bij de productie van fenolische- en epoxyharsen en polycarbonaten. Deze polycarbonaten zijn thermoplastics die vanwege hun hardheid en doorzichtigheid veelvuldig gebruikt worden. Enkele toepassingen hiervan kan men terugvinden in producten zoals CD's, herbruikbare flessen, veiligheidsglas, brilglazen en bushokjes (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005). Ook aceton dat bijvoorbeeld gebruikt wordt voor de productie van solventen, cosmetica, explosieven, vernis en verven komt voort uit cumeen (Hatch & Matar, 2001).

Isopropanol werd in 1920 als eerste chemisch product uit een uit aardolie afkomstige olefine geproduceerd. Het is één van de goedkoopste alcoholen en vervangt daarom ethanol vaak als solvent. Men kan er onder andere aceton en isopropylacetaat (voor gebruik in solventen) uit produceren (Hatch & Matar, 2001).

Butadiëen

Butadiëen is een kleurloos en vrij reactief gas dat wordt gebruikt in de productie van synthetische rubbers (Speight, 2006). Het wordt voor het grootste deel bekomen door het stoom-of katalytisch kraken van aardoliefracties en in beperkte mate door dehydrogenatie van butanen en butenen (White, 2007). Een mogelijk afgeleid product van butadiëen is nitril-butadiëen-rubber. Verder dient butadiëen, samen met styreen, ook nog in de vorming van styreen-butadiëen-rubber. Ook acrylonitril-butadiëen-styreen wordt medegevormd aan de hand van dit product.

Butenen

Butenen worden geproduceerd tijdens het kraken van aardolie om benzine te bekomen of via katalytische dehydrogenatie van butaan (Hatch & Matar, 2001). Deze butenen worden omgevormd tot hogere olefinen, met kettingen van tot 20 of meer koolstofatomen, die gebruikt worden in plastics, weekmakers en chemicaliën zoals agrochemicaliën (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005).

Isobutyleen

Isobutyleen, ten slotte, dient voornamelijk voor de productie van additieven en synthetisch rubber. Methyl-tert-butylether of kortweg MTBE is een additief dat wordt toegevoegd aan benzine om een hoger octaangetal en lagere uitstoot van uitlaatgassen te bekomen (Chisala et al., 2007). Polyisobutyleen is een elastomeer dat bijzonder is omdat het een synthetisch rubber is dat ondoorlaatbaar is voor gas. Vanwege deze eigenschap wordt het onder andere gebruikt in autobanden en sportballen. Het wordt echter ook in andere toepassingen zoals kauwgum, plakstoffen en motorsmeermiddelen gebruikt (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005).

4.3.14.3 Chemicaliën uit aromaten

Aromaten zijn chemische verbindingen die gekenmerkt worden door een ringstructuur. Deze zijn in beperkte mate aanwezig in ruwe aardolie, maar worden er in de meeste gevallen uit afgeleid via een aantal chemische processen (Speight, 2006). Zo kunnen de niet-aromatische componenten uit aardolie tot aromaten worden omgevormd via bepaalde reformingprocessen. Ook worden ze

Tolueen

Tolueen kent veel minder chemische toepassingen dan benzeen. Wel wordt het vaak gebruikt in de vorming van nitrotoluenen. Het bekendste voorbeeld binnen deze klasse is trinitrotolueen (TNT) dat gebruikt wordt in springstoffen en bekomen wordt door de nitratie van tolueen (Chen, Juan, & Wei, 2005). Toluendiisocynaat, dat ook uit tolueen kan geproduceerd worden, wordt gebruikt in afdichtingsproducten, plakstoffen en de productie van polyurethaan (Burdick & Leffler, 1990). Een laatste belangrijk gebruik van tolueen kan men terugvinden in solventen en in de aanmaak van het bruikbaarere benzeen en xyleen (Meyers, 2004).

Xyleen

Xyleen, ten slotte, kan zowel gebruikt worden in zijn ortho-, meta- als paravorm (Gary & Handwerk, 2001). Deze drie isomeren worden door middel van oxidatie omgezet tot zure producten zoals tereftaalzuur in het geval van paraxyleen. Deze zuren worden vervolgens gebruikt in de aanmaak van tal van producten zoals vezels, plastics, solventen en weekmakers. Deze weekmakers, die uit orthoxyleen gewonnen worden, worden toegevoegd aan materialen om ze flexibeler en bewerkbaar te maken (Hatch & Matar, 2001). Een toepassing hiervan is flexibel PVC, dat gebruikt wordt in ontelbare producten zoals elektrische kabels, computers, mobiele telefoons, speelgoed en verpakkingen. Het commercieel het meest belangrijk is echter de paravorm van xyleen. Deze vorm wordt gebruikt voor de fabricage van polyesters (Meyers, 2004).

4.3.14.4 Chemicaliën uit methanol

Methanol (methylalcohol) wordt als aparte categorie vermeld omdat deze niet thuishoort onder voorgaande categorieën maar evenzeer een belangrijk product is in de aanmaak van enkele petrochemische afgeleiden. Onder de belangrijkste hiervan kan men ten eerste MTBE, dat gebruikt wordt als additief in benzine, onderscheiden (Chisala et al., 2007). Ook polymethylmethacrylaat is een product dat uit methanol kan geproduceerd worden (Hatch & Matar, 2001). Dit product wordt onder andere gebruikt in wegensignalisatie, harde lenzen en (auto)lichten en is meer bekend onder de naam plexiglas. Hiernaast worden nog een aantal andere chemische producten afgeleid van methanol, waarvan formaldehyde veruit het belangrijkste is. Hieruit worden op zijn beurt fenolische harsen en polyurethanen gemaakt (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005). Verder kan methanol ook via specifieke chemische processen worden omgezet tot ethyleen en propyleen (Meyers, 2004).

4.3.14.5 Chemicaliën uit anorganische componenten

Uit aardolie kan men ten slotte ook een aantal anorganische chemische producten bekomen. Deze producten worden gekenmerkt door het feit dat ze geen koolstofatomen bevatten. Een belangrijk

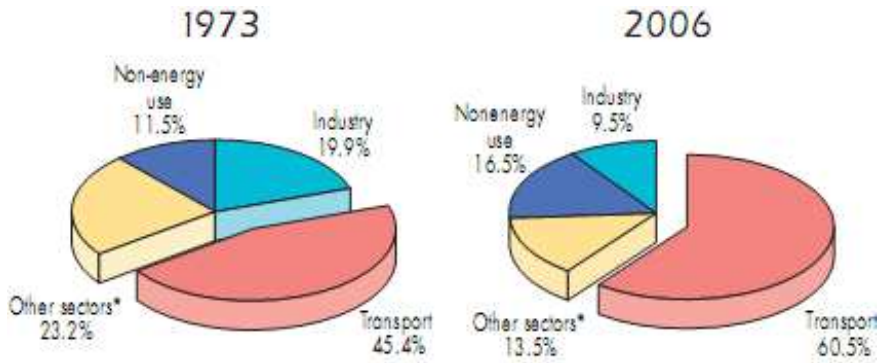
voorbeeld hiervan is ammoniak, gevormd door een reactie van waterstof en stikstof (Speight, 2006). Het waterstof dat hier voor nodig is is vaak afkomstig van koolwaterstoffen die te vinden zijn in aardgas, raffinagegassen en nafta en kan op zich ook worden beschouwd als een anorganische afgeleide van aardolie (Hatch & Matar, 2001). Ammoniak wordt vaak gebruikt in de productie van ammoniumnitraat en andere ammoniumzouten die gebruikt worden als meststof (Ahlgren et al., 2008).

Zwavel is ook een anorganische stof die bekomen kan worden uit petrochemische processen. Dit product ontstaat door de oxidatie van waterstofsulfide. Dit waterstofsulfide komt voor in aardgas en een groot deel van de raffinagegassen. Het geproduceerde zwavel wordt onder andere aangewend in de productie van koolstofdissulfide, met een gebruik als oplosmiddel, en chemicaliën voor gebruik in de pulp- en papierindustrie (Speight, 2006). Het belangrijkste gebruik ervan ligt echter in de omvorming tot zwavelzuur dat voor diverse doeleinden, bijvoorbeeld in de productie van andere chemische producten en meststoffen, gebruikt kan worden (Hatch & Matar, 2001).

In bijlage 3 wordt een overzichtelijke samenvatting gegeven van de diverse beschreven petrochemicaliën en de verschillende producten waarin ze verwerkt worden.

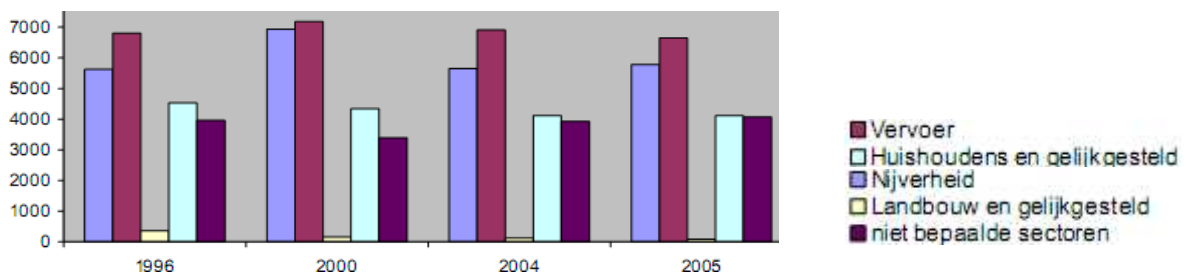
4.4 Conclusie

Ruwe aardolie is een product dat een groot belang heeft in de wereldeconomie. In zijn ruwe vorm is het product weinig bruikbaar, maar door de toepassing van diverse raffinageprocessen kunnen er een verscheidenheid aan specifieke producten uit geproduceerd worden. Deze kunnen dan gebruikt worden in een waaier van toepassingen. Zoals uit figuur 4.4 kan worden afgeleid, staat transport in voor het grootste verbruik van aardolieproducten. Hierbij valt op te merken dat dit aandeel is toegenomen in vergelijking met de jaren '70 en analisten verwachten dat deze trend zich ook in de toekomst verder zal zetten (International Energy Agency, 2008b). Verder valt op dat het gebruik van aardolie als energiebron in de industrie relatief gezien minder belangrijk wordt. Dezelfde conclusie kan worden getrokken voor het energieverbruik in andere sectoren. Hieronder verstaat men onder ander de landbouw, commerciële- en overheidsdiensten en residentieel gebruik. Het niet-energiegebruik, ten slotte, wordt wel gekenmerkt door een belangrijkere positie in het totale aardolieverbruik. Hiertoe behoren bijvoorbeeld smeeroliën, asfalt en petrochemicaliën (International Energy Agency, 2008a). Men schat dat ongeveer vier procent van alle aardolie als voedingsbron in de petrochemische sector gebruikt wordt (Molnár & Olah, 2003).



Figuur 4.4 : Wereldwijd gebruik van aardolie per toepassingsgebied (International Energy Agency, 2008a, p. 33)

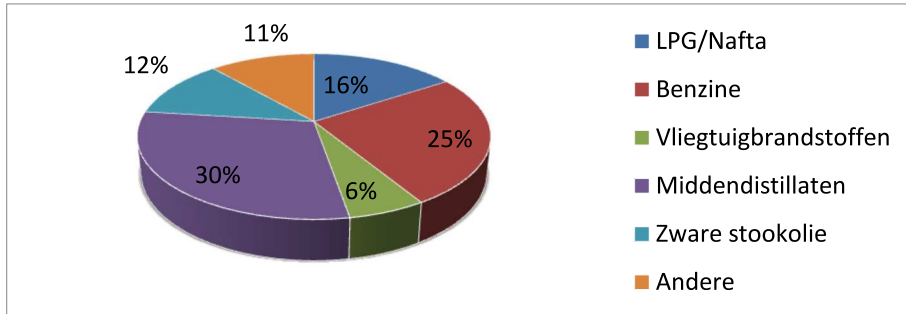
Een vergelijkbare analyse kan voor de Belgische situatie gemaakt worden, al wordt hierbij wel gebruik gemaakt van een iets andere indeling. Zoals op onderstaande figuur kan worden afgelezen is de transportsector ook in België de belangrijkste verbruiker van aardolie. Het overwicht ervan is, met ongeveer 32 procent, echter minder uitgesproken. Het verbruik van aardolie in de industrie is daarentegen, met een aandeel van 28 procent, veel groter dan het wereldwijde gemiddelde. Binnen deze sector vormt de chemie, met 57 procent van het industriële verbruik, de belangrijkste afnemer. Vanwege het belang van de chemische en petrochemische sector in het land is dit een logische vaststelling (FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie, 2006). Het verbruik van huishoudens en andere sectoren bedraagt telkens ongeveer 20 procent van het totale aardolieverbruik. Vanwege het tegenwoordig marginale belang van de landbouw in de Belgische economie blijft ook het verbruik binnen deze sector, ten slotte, zeer beperkt.



Figuur 4.5: Belgisch gebruik van aardolie per toepassingsgebied, in 1000 ton (FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie, 2006, p. 17)

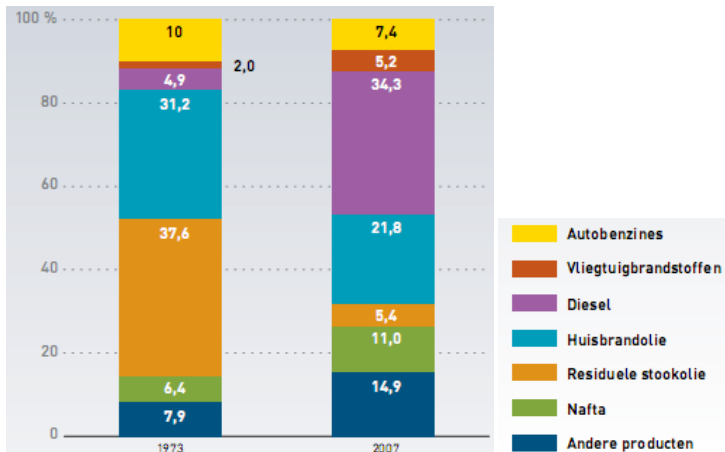
Indien men kijkt naar de afzonderlijke producten valt op dat de middendistillaten (kerosine, diesel, huisbrandolie) en benzine, met een aandeel van 30 respectievelijk 25 procent, globaal gezien veruit de belangrijkste uit aardolie geproduceerde eindproducten zijn. Dit is in lijn met het grote aandeel van transportdoeleinden in het totale aardolieverbruik. Ook vliegtuigbrandstoffen worden gebruikt in het transport, al blijft het aandeel hiervan in het totale aardolieverbruik, met ongeveer 6%, vrij beperkt. De lichtste fracties, LPG en nafta, die zowel in brandstoffen en petrochemicaliën

hun gebruik kennen maken ongeveer 16 % uit van het aardolieverbruik. Zware stookolie en andere gebruiken (smeeroliën, asfalt, petroleumwassen) hebben beiden een aandeel van iets meer dan tien procent in het totale verbruik (International Energy Agency, 2008c).



Figuur 4.6: Wereldwijd aardolieverbruik opgesplitst naar productcategorieën (International Energy Agency, 2008c, eigen opmaak)

Als men tenslotte de situatie in België onderzoekt komt men tot de cijfers die op onderstaande figuur weergegeven zijn. Hierbij valt op dat het verbruik van benzine in ons land veel lager ligt dan het wereldwijde gemiddelde. Dit kan verklaard worden door het grotere verbruik van diesel, dat sinds 1973 een opvallende stijging heeft gekend. Ook het verbruik van huisbrandolie ligt in België opvallend hoog (Belgische Petroleum Federatie, 2007a).



Figuur 4.7: Procentueel Belgische verbruik van aardolieproducten (Belgische Petroleum Federatie, 2007a, p. 35)

Op tabel 4.2 zijn de verschillende aardolieproducten en de belangrijkste gebruiken daarvan op een overzichtelijke en samenvattende wijze weergegeven. Deze tabel maakt eveneens duidelijk welk belang elk product heeft in het totale wereldwijde aardolieverbruik.

Tabel 4.2: De verschillende aardolieproducten met hun toepassingen en hun relatief aandeel in het totale verbruik van aardolieproducten (eigen opmaak)

Product	Relatief verbruik	Belangrijkste toepassingen	
Petroleumgassen <i>LPG</i> <i>Raffinagegassen</i>	16%	Voertuigbrandstof, petrochemicaliën, verwarming, voedselbereiding Petrochemicaliën, brandstof in raffinage	
Nafta		Solvent, petrochemicaliën	
Benzine	25%	Voertuigbrandstof, vliegtuigbrandstof	
Vliegtuigbrandstof	6%	Vliegtuigbrandstof	
Kerosine	30%	Verwarming, verlichting, voedselbereiding, vliegtuigbrandstof, solvent	
Stookoliën <i>Huisbrandolie</i>		Verwarming	
<i>Diesel</i>		Voertuigbrandstof, elektriciteitsopwekking	
<i>Zware stookolie</i>	12%	Scheepsbrandstof, elektriciteitsopwekking, industriële boilers	
Smeeroliën	11%	Smeermiddel	
Andere afgeleide oliën		Farmaceutische-, cosmetische- en voedingssector, pesticiden en herbiciden	
Petroleumwas	11%	Voedings- en textielindustrie, kaarsen, boenmiddel, replica's	
Smeervet		Smeermiddel	
Asfalt		Wegenconstructie, dakbedekking	
Cokes	100%	Hoogovens, elektriciteitsproductie, aluminiumproductie	
Petrochemicaliën <i>Olefinen</i>		4%	Plastics, synthetisch rubber, solventen, weekmakers, synthetische vezels
<i>Aromaten</i>			Plastics, nylon, solventen, springstof, synthetisch rubber,...
<i>Methanol</i>			Benzineadditieven, ethyleen en propyleen, plexiglas
<i>Anorganische</i>			Meststoffen, waterstofproductie, oplosmiddelen

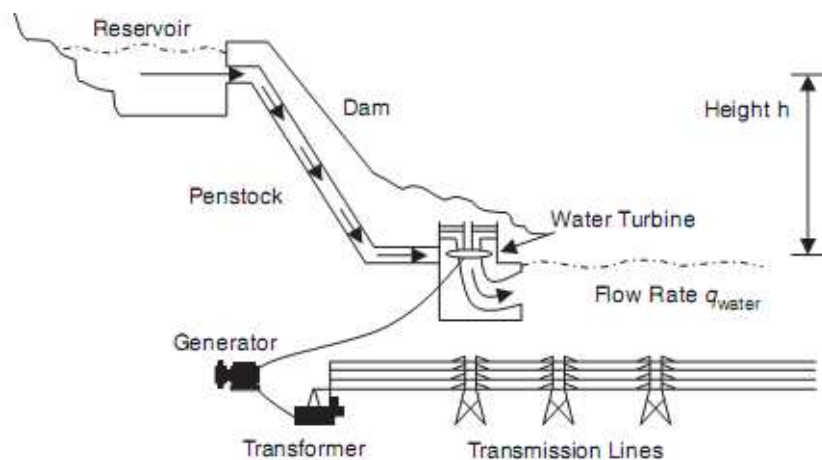
Hoofdstuk 5: Alternatieven voor aardolie

Vanwege de diversiteit aan toepassingen gebaseerd op het product aardolie bestaat er een groot platform waarop mogelijke alternatieven voor aardolie kunnen ontwikkeld worden. In dit hoofdstuk zullen dan ook de belangrijkste en meest belovende technologieën aan bod komen. Van elk alternatief wordt een uitgebreide beschrijving en de mogelijke toepassingsgebieden ervan weergegeven. Tot slot wordt het potentieel van deze technieken als mogelijke vervangers voor aardolie beschreven.

5.1 Waterkracht

Waterkracht is een hernieuwbare energiebron die reeds geruime tijd bij de mensheid bekend is, getuige verschillende eeuwenoude, op waterkracht aangedreven graanmolens. Tegenwoordig wordt deze energievorm echter vaak aangewend in het produceren van elektriciteit (D'Haeseleer, 2005). Hiervoor gebruikt men waterkrachtcentrales die zorgen voor een omzetting van de kinetische energie aanwezig in stromend of vallend water.

In feite is de mogelijkheid om elektriciteit uit waterkracht te halen te danken aan de zon. Deze zorgt er namelijk voor dat het water uit bijvoorbeeld oceanen verdampt en zo aan de watercyclus begint. Op zijn terugweg naar de oceaan kan men dan de energie die dit water meedraagt omvormen tot een bruikbare vorm (Enova, Innovation Norway, NVE & The Norwegian Research Council, 2007). Op figuur 5.1 wordt schematisch weergegeven hoe een waterkrachtcentrale die energie haalt uit het hoogteverschil dat het water ondergaat elektriciteit produceert.



Figuur 5.1: Het werkingsprincipe van een waterkrachtcentrale (Fanchi, 2004, p. 367)

Het water uit het stuwmeer stroomt omwille van de zwaartekracht naar het lageregelegen waterniveau waardoor de potentiële energie die het bezat wordt omgezet in kinetische energie (Fanchi, 2004). Deze bewegingsenergie die gepaard gaat met het neerstortende water drijft vervolgens een turbine aan. De kracht waarmee dit gebeurt hangt af van het volume van het verplaatste water en het hoogteverschil (of de snelheid van de stroming in het geval van een centrale die niet van een hoogteverschil gebruik maakt). De turbine drijft op zijn beurt een generator aan, die de kinetische energie omzet in elektriciteit. Deze elektriciteit wordt ten slotte via het elektriciteitsnetwerk verdeeld (Kosnik, 2008).

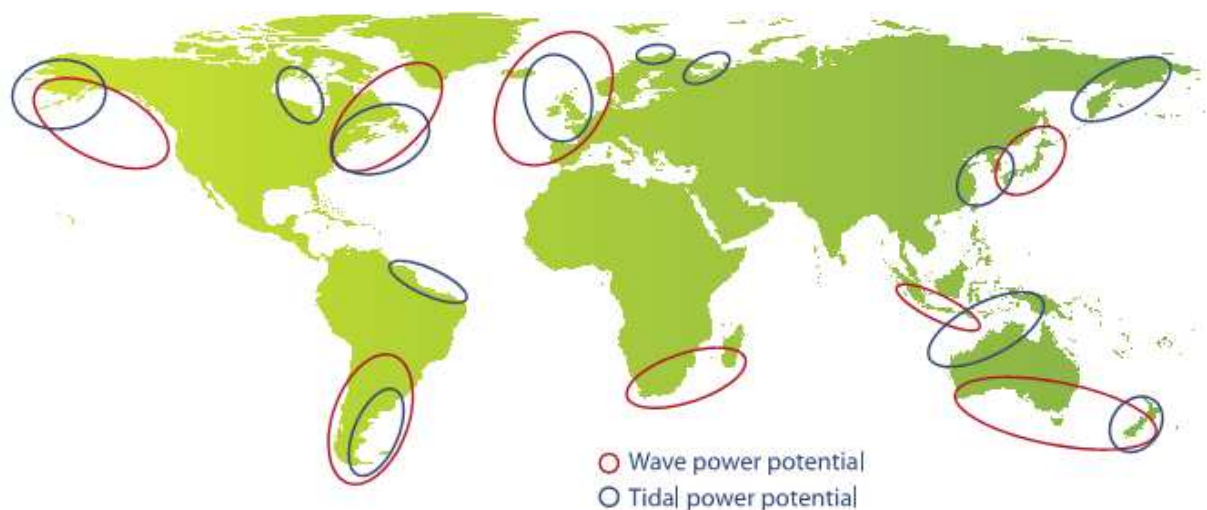
Waterkracht is een van de meest ontwikkelde technologieën die gebruikt kunnen worden als alternatieve energiebron (Twidell & Weir, 2006). Zo zorgt het wereldwijd voor ongeveer 87 procent van de via hernieuwbare energie opgewekte elektriciteit. Bovendien wordt in maar liefst 160 landen op één of andere manier elektriciteit opgewekt uit waterkracht. Meer dan de helft van de totale productie wordt echter gerealiseerd in slechts vijf landen, namelijk Brazilië, Canada, China, Rusland en de Verenigde Staten (World Energy Council, 2007).

Waterkracht is zo populair omdat de gebruikte technologie goed ontwikkeld is en bovendien gebruikt kan worden in combinatie met diverse watermanagementprojecten. Voorbeelden hiervan zijn irrigatie, overstromingsbescherming, recreatie en de verzekering van wateraanvoer (Bakis, 2007). Verder wordt het zo vaak toegepast omdat waterkrachtenergie kan worden gebruikt als ondersteunende elektriciteitsvoorziening wanneer de vraag groter is dan het aanbod. Het is namelijk mogelijk om de hoeveelheid water opgeslagen in het stuwmeer al dan niet te gebruiken naargelang de vraag (Førsund, 2005). Dit is een zeer interessante eigenschap aangezien grote hoeveelheden elektriciteit op zich moeilijk op te slaan zijn, en er op deze manier via waterkracht wel een vorm van stockage kan zijn (Enova et al., 2007). Waterkracht kan daarom ook uitstekend dienen in combinatie met andere vormen van hernieuwbare energie. Zo is de hoeveelheid elektriciteit die men kan produceren uit windenergie erg afhankelijk van de natuurlijke omstandigheden. Waterkrachtelectriciteit kan in het geval van onvoldoende windsterkte het tekort opvangen (World Energy Council, 2007).

Een belangrijk nadeel van waterkracht is de hoge initiële investeringskost die ermee gepaard gaat. Deze ligt vaak veel hoger dan bij andere elektriciteitscentrales (D'Haeseleer, 2005). Verder is waterkracht één van de zuiverste bronnen voor de productie van elektriciteit, maar kan het niettemin een aanzienlijke negatieve impact op het milieu teweegbrengen. Vooral zeer grote projecten zoals die van de Drieklovendam in China zijn desastreus (Brown, Magee, & Xu, 2008). Enerzijds bestrijkt het ontstane stuwmeer een enorm gebied waardoor miljoenen mensen dienen te verhuizen en vele dieren en planten hun habitat kwijtgeraken, anderzijds houden de dammen vruchtbaar slib tegen waardoor de vruchtbaarheid van het stroomafwaartse gebied sterk daalt

(Twidell & Weir, 2006). Bovendien hebben deze installaties een sterke negatieve impact op het visbestand (Kosnik, 2008).

Een alternatieve vorm van waterkracht is die waarbij de kracht van golven en getijden van oceanen en zeeën wordt omgezet in elektriciteit (Fujita & Pelc, 2002). Op onderstaande figuur valt af te lezen op welke plekken in de wereld deze technologieën bestaansmogelijkheden hebben. Het wereldwijde potentieel van dit soort energie is zeer groot (tot enkele maal de jaarlijkse energiebehoefte van de wereldbevolking), maar wordt op dit moment slechts beperkt benut (Fanchi, 2004). Dit heeft vooral te maken met de zeer hoge investeringskost en beperkte ontwikkeling van de betrokken technologie (World Energy Council, 2007).



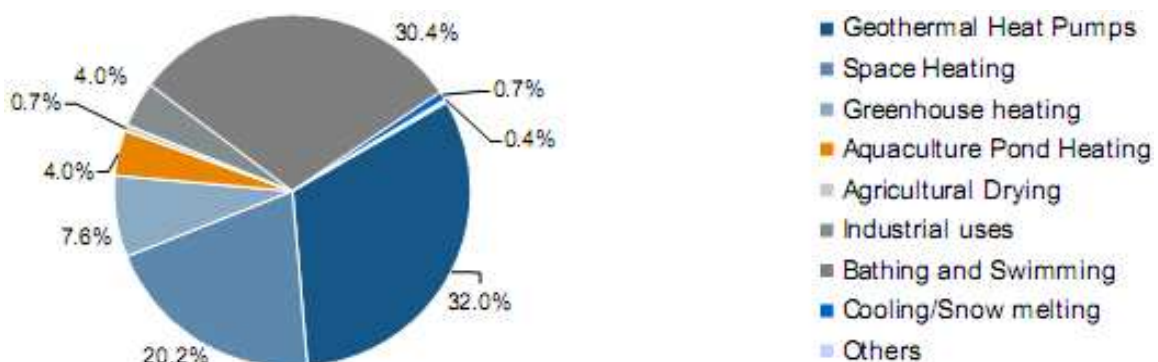
Figuur 5.2: Gebieden met het grootste potentieel voor energiewinning uit golf- en getijdenkracht. (Enova, Innovation Norway, NVE & The Norwegian Research Council, 2007, p. 76)

5.2 Geothermische energie

Geothermische energie is energie, in de vorm van warmte, die voorkomt in het binnenste van de aarde. Ze bestaat zowel uit energie die ontstond bij de vorming van de aarde als uit energie uit nucleaire reacties in de aardkorst (D'Haeseleer, 2005). Studies tonen aan dat de temperatuur gemiddeld met 25 tot 30 graden Celsius per kilometer diepte toeneemt, al kan dit in gebieden met gunstige geologische omstandigheden veel hoger liggen (Barbier, 2002). Om van dit warmteverschil gebruik te kunnen maken dient men een put te boren totdat een bepaalde gewenste temperatuur en diepte bereikt is (Kaltschmitt, Streicher, & Wiese, 2007). Afhankelijk van de warmte en dus de energie die op deze manier ontgonnen kan worden, kan geothermische energie voor twee toepassingen gebruikt worden (World Energy Council, 2007).

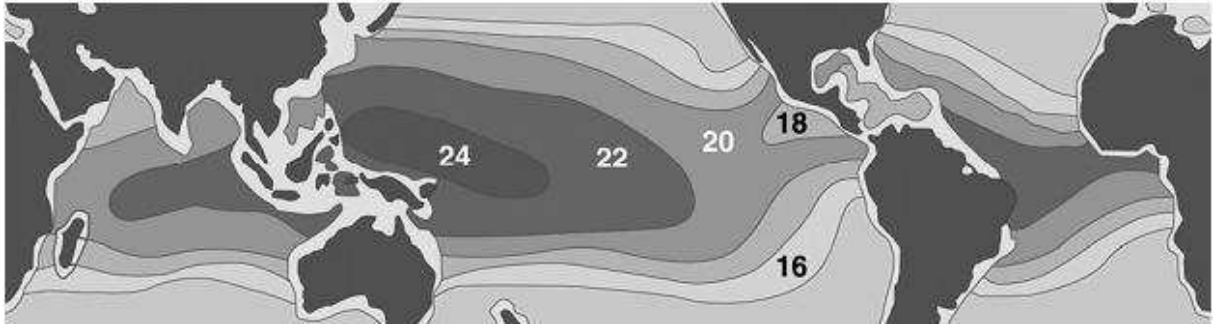
Ten eerste kan men de geothermische energie aanwenden voor de productie van elektriciteit (Twidell & Weir, 2006). Rechtstreekse winning van elektriciteit is echter gewoonlijk slechts mogelijk bij temperaturen boven de 150 graden Celsius (Barbier, 2002). Hierbij drijft het stoom dat uit de bron afkomstig is een klassieke stoomturbine aan die gekoppeld is aan een elektriciteitsgenerator. Bij lagere temperaturen (vanaf 85°C) kan men gebruik maken van zogenaamde binaire systemen. Hierbij wordt de uit de aarde afkomstige warmte gebruikt om een tweede vloeistof, met een lager kookpunt, op te warmen. De gassen die hierbij ontstaan drijven opnieuw een stoomturbine aan (Fanchi, 2004).

Aardwarmte kan echter ook rechtstreeks gebruikt worden in tal van toepassingen, waarvan de belangrijkste terug te vinden zijn in onderstaande figuur. De temperatuur die nodig is voor deze toepassingen ligt lager dan die benodigd voor de winning van elektriciteit, waardoor de technologie op grotere geografische schaal kan worden toegepast (Lund, 1997). Het potentieel is vooral op het gebied van ruimte- en waterverwarming groot omdat in geïndustrialiseerde landen ongeveer 30 procent van de verbruikte energie hieraan besteed wordt (World Energy Council, 2007).



Figuur 5.3: Directe toepassingen van geothermische energie (World Energy Council, 2007, p. 433)

Een variant op geothermische energie is oceaanthermische energie. Er bestaan verschillen in temperatuur tussen oppervlaktewater en diepe waterlagen (D'Haeseleer, 2005). Dit temperatuurverschil kan vervolgens gebruikt worden om bijvoorbeeld elektriciteit te produceren. Hiervoor dient het water aan de oppervlakte minstens 20 graden Celsius warmer te zijn dan dat op één kilometer diepte (Tanner, 1995). Grote delen van de oceaan, die zoals uit figuur 5.4 blijkt vooral in de nabijheid van eilanden en ontwikkelingslanden liggen, komen hiervoor in aanmerking. Het potentieel van deze techniek is dan ook groot, maar de investerings- en productiekosten zijn dat ook (Twidell & Weir, 2006). Daarom wordt het voornamelijk nog weinig toegepast en verwacht men in de nabije toekomst geen globale commerciële doorbraak. Wel ziet men potentieel in de aanwending ervan op afgelegen eilanden, waar de economische waarde ervan nog kan worden verhoogd door de techniek te combineren met de aanmaak van zoet water (Fujita & Pelc, 2002).



Figuur 5.4: Mogelijke toepassingsgebieden van oceaanthermische energie (World Energy Council, 2007, p. 566)

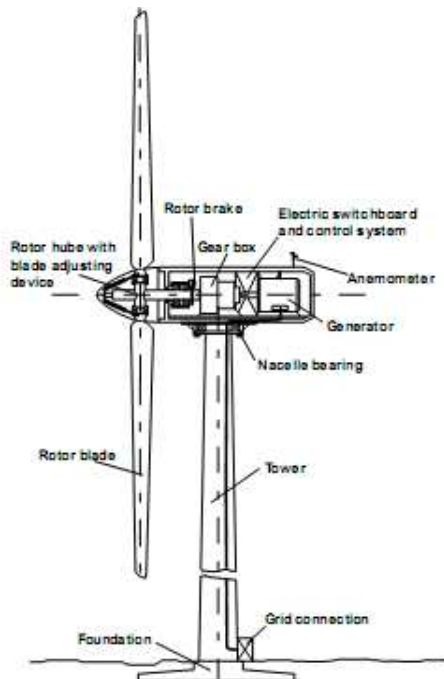
5.3 Windenergie

Windenergie wordt reeds sinds geruime tijd door de mensheid aangewend, bijvoorbeeld in windmolens en zeilboten (da Rosa, 2005). Tegenwoordig wordt het nog steeds gebruikt voor de aandrijving van boten, zij het in beperkte mate. De focus ligt nu vooral op het winnen van elektriciteit (Twidell & Weir, 2006). Deze technologie is, ondanks dat deze slechts ongeveer dertig jaar bestaat, een van de meest ontwikkelde inzake hernieuwbare energie (Hanjalic et al., 2008).

Windenergie dient vaak gesubsidieerd te worden om economisch haalbaar te zijn, vooral vanwege hoge investeringskosten, maar is toch een van de meest concurrentiële technologieën op het vlak van hernieuwbare energie (DeCarolis & Keith, 2006). Vooral vanwege de zeer lage externe kosten (windenergie is het minst vervuilend van alle energiebronnen) opteren overheden voor subsidiëring (Hanjalic et al., 2008). Mede hierdoor verdubbelt de wereldwijde geïnstalleerde capaciteit van windenergie sinds 1990 gemiddeld om de drie en een half jaar (World Energy Council, 2007). Nadelen van dergelijke windmolens die kunnen worden aangehaald zijn visuele vervuiling, geluidshinder en een negatieve impact op trekpatronen van vogels (Fanchi, 2004). Ook is men afhankelijk van de weersomstandigheden en bijgevolg dus niet verzekerd van een stabiele elektriciteitsaanvoer.

Windenergie kan zowel via windmolens op land als op zee geproduceerd worden. Deze laatste zijn veel duurder in constructie maar kennen ook een grotere opbrengst vanwege grotere en stabielere windsterktes (Boesmans et al., 2003). Waar ze ook geplaatst worden, windmolens werken allemaal volgens hetzelfde principe. Wind zorgt ervoor dat de bladen van de propeller beginnen te draaien. Hierdoor draait ook de as waarop de bladen bevestigd zijn mee. Het windmolensysteem zet vervolgens via de generator de kinetische energie van deze draaibeweging om in elektriciteit. Een hedendaagse windmolen produceert elektriciteit wanneer de windsnelheid zich tussen de 4 en 25 meter per seconde bevindt (da Rosa, 2005). Bij hogere snelheden dient er een soort van

veiligheidsmechanisme op te treden waardoor mogelijke schade aan de windmolen vermeden wordt. Op onderstaande figuur staan de voornaamste componenten van een windmolen afgebeeld. Het betreft hier de meest voorkomende, horizontale variant hoewel ook een verticale configuratie van de as mogelijk is (Jentsch, Müller, & Stoddart, 2009).

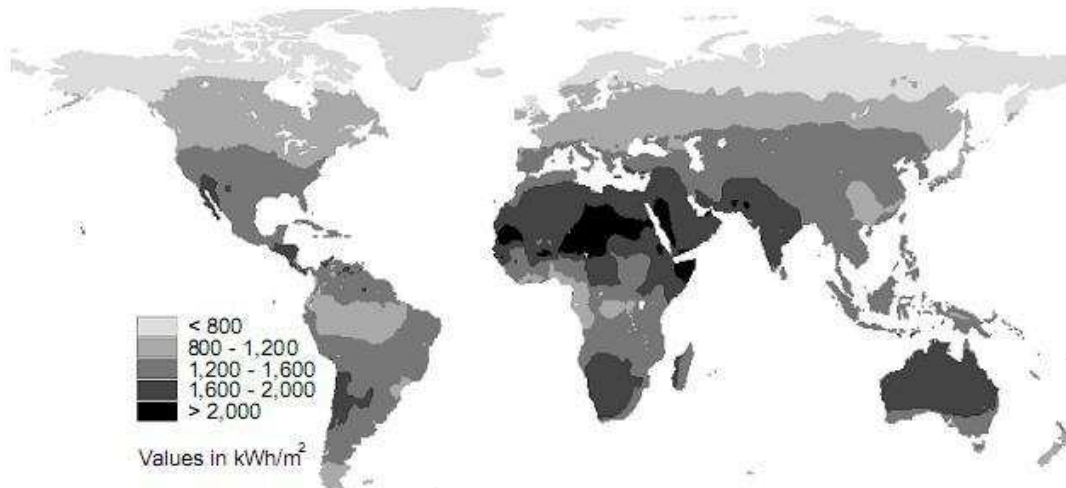


Figuur 5.5: Opbouw van een windmolen (Kaltschmitt, Streicher, & Wiese, 2007, p. 310)

5.4 Zonne-energie

De zon produceert door middel van kernfusie enorme hoeveelheden energie (Fanchi, 2004). Een gedeelte van deze energie bereikt de aarde en uiteindelijk ook het aardoppervlak. Deze jaarlijkse hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt is duizenden malen groter dan het jaarlijkse verbruik van primaire energie, waardoor het potentieel van zonne-energieapplicaties enorm is (World Energy Council, 2007). Op figuur 5.6 valt duidelijk op te merken dat bepaalde gebieden substantieel meer zonnestraling ontvangen dan andere. Hier zullen toepassingen van zonne-energie dan ook een hoger rendement kunnen halen (Kaltschmitt et al., 2007).

Op het gebied van de aanwending van zonne-energie als hernieuwbare energiebron kan men twee grote toepassingsgebieden terugvinden. De straling van de zon kan namelijk gebruikt worden bij het opwekken van warmte enerzijds en elektriciteit anderzijds (Thompson & Turk, 2004).



Figuur 5.6: Wereldwijde verdeling van de gemiddelde invallende zonnestraling (Kaltschmitt, Streicher, & Wiese, 2007, p. 40)

5.4.1 Zonnewarmte

Binnen de categorie waarbij men met zonne-energie warmte opwekt kan men allereerst passieve zonne-energie onderscheiden. Hierbij wordt er niet gebruik gemaakt van speciale apparatuur, maar wordt de energie van de zon direct gebruikt om bijvoorbeeld een ruimte te verwarmen (Fanchi, 2004). Hierbij schijnt het zonlicht door transparante materialen zoals ramen waarna het in het huis wordt geabsorbeerd door vloeren, meubels en muren. Deze materialen zenden de geabsorbeerde energie vervolgens terug uit als warmte (Kaltschmitt et al., 2007). Dit proces gebeurt in elk huis, maar men kan de woning ook speciaal bouwen met het oog op een maximale benutting van passieve zonne-energie. Op die manier kan men op verwarmingskosten besparen en zo het verbruik van bijvoorbeeld huisbrandolie verminderen (Garrett & Koontz, 2008). Verder kan een goed ontworpen huis voldoende natuurlijke lichtinval verzekeren waardoor men minder elektriciteit zal moeten verbruiken (Omer, 2008). Al deze maatregelen zorgen ervoor dat het energieverbruik in gebouwen, dat in geïndustrialiseerde landen tot 40 procent van het primaire energieverbruik uitmaakt, tot 75 procent zou kunnen dalen (World Energy Council, 2007).

Men kan ook via bewust ontworpen apparaten gebruik maken van de warmte-energie van de zon. Deze actieve variant maakt gebruik van een zonnecollector om de straling van de zon om te zetten in warmte (Thompson & Turk, 2004). De warmte die in deze zonnecollector wordt opgevangen wordt vervolgens overgezet in een transfermedium. Hiervoor wordt voornamelijk water gebruikt, maar ook lucht en zelfs olie (bij hogere benodigde temperaturen) komen in aanmerking. Een derde belangrijke component is het distributiesysteem dat er voor zorgt dat de energie op de plaats van toepassing geraakt. Hiertoe behoren onder andere leidingen, pompen en een opslagtank (Enova et al., 2007). Op figuur 5.7 is het werkingsprincipe van een actief zonnewarmtesysteem grafisch weergegeven. Vaak zal men echter bij deze systemen nog een secundaire energiebron, zoals een

stookolieverbrander, plaatsen om het onzekere karakter van de zonnestraling op te vangen (Fanchi, 2004).



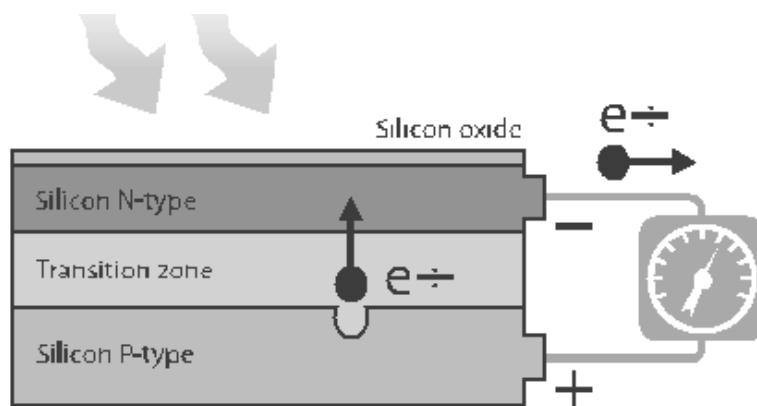
Figuur 5.7: Het werkingsprincipe van een actief zonnearmsysteem (Enova, Innovation Norway, NVE & The Norwegian Research Council, 2007, p. 14)

Actieve zonnearmte kent voornamelijk een gebruik in huishoudelijke- en kantoortoeepassingen. Vooral vloerverwarming en waterverwarmingsinstallaties worden vaak van energie voorzien door middel van zonnearmte. Het grootste potentieel ligt echter in toepassingen die veel energie vereisen wanneer de zon het felst is. Hierbij kan men denken aan het verwarmen van openluchtzwembaden. Ook voor absorptiekoeling met bijvoorbeeld ammoniak kan men gebruik maken van door zonne-energie verwarmd water (Kyriakis, Oxizidis, & Papadopoulos, 2003). Verder kunnen hout, steenkool, kerosine of propaan in de voedselbereiding gedeeltelijk vervangen worden door zogenaamde zonnekokers, hetgeen vooral interessant is in ontwikkelingslanden (Pouris & Wentzel, 2007). Ten slotte kan men actieve zonnearmte ook gebruiken voor de opwekking van elektriciteit (Twidell & Weir, 2006). Hiervoor maakt men gebruik van spiegels om de zonnestraling te concentreren. Deze wordt dan in een zonnecollector omgezet tot warmte en doorgegeven aan een transfermedium. Door de grote hitte verdampt deze vloeistof en zal het ontstane gas een stoomgenerator aandrijven die elektriciteit opwekt (Fanchi, 2004).

5.4.2 Fotovoltaïsche zonne-energie

Bij foto-elektrische zonnepanelen wordt zonne-energie direct omgezet in elektriciteit (Omer, 2008). Op figuur 5.8 valt af te lezen dat indien er voldoende sterk zonlicht op de zonnecel valt, hierin vanwege het foto-elektrische effect een elektronenstroom ontstaat. Deze elektronenstroom is de elektriciteit die we in tal van toepassingen kunnen gebruiken (Twidell & Weir, 2006). Zo worden zonnecellen gebruikt ter vervanging van batterijen in kleine apparaten zoals rekenmachines en horloges, al vertegenwoordigd dit slechts een beperkt aandeel in de totale hoeveelheid via zonnecellen geproduceerde elektriciteit.

Een belangrijkere toepassing vindt men terug in de fotovoltaïsche zonnepanelen die gebruikt worden om te voorzien in de elektriciteitsbehoeften van gezinnen en bedrijven (Kaltschmitt et al., 2007). Deze panelen kunnen aangesloten zijn op het net waardoor overschotten kunnen worden teruggeven. Verder hebben zonnepanelen een belangrijk voordeel omdat ze gebruikt kunnen worden in gebieden die niet economisch verantwoord op het elektriciteitsnet kunnen worden aangesloten (Omer, 2008). Op deze markt zijn zonnepanelen zelfs op zich reeds concurrentieel ten opzichte van andere energiebronnen zoals dieselgeneratoren. In dichtbevolkte gebieden dienen ze echter vaak gesubsidieerd te worden, iets wat in vele landen ook massaal gebeurt (World Energy Council, 2007). Men verwacht echter dat zonnecellen ook hier concurrentieel worden, zeker indien men grote installaties in gebruik neemt waardoor er schaalvoordelen ontstaan (Pearce, 2002).



Figuur 5.8: Het werkingsprincipe van een zonnecel (Enova, Innovation Norway, NVE & The Norwegian Research Council, 2007, p.20)

5.5 Waterstof

Waterstof is het eerste element van de periodieke tabel en daarom qua samenstelling ook het meest eenvoudige. De stof wordt door velen genoemd als mogelijke vervanger van fossiele brandstoffen in het globale energiegebruik (Bustnes, Datta, Glasgow, Koomey, & Lovins, 2005). Zij gaan ervan uit dat we in de toekomst in een zogenaamde waterstofeconomie zullen leven (Clark, 2008).

Waterstof kan echter niet gezien worden als een energiebron. Het is namelijk enkel een drager van energie (Clark, 2008). Men heeft dus nood aan een andere energiebron om waterstof te produceren vooraleer deze in de voorziene toepassingen kan gebruikt worden (Fanchi, 2004). Dit kan op verschillende manieren gebeuren. Op dit moment wordt het grootste deel van het wereldwijd geproduceerde waterstof gevormd door de stoomreforming van aardgas, waarbij de aanwezige koolwaterstoffen zoals methaan worden afgesplitst in waterstof en koolstofmonoxide.

Een ander techniek die men kan gebruiken is elektrolyse van water. Door een elektrische stroom door water te laten lopen kan men zijn componenten, waterstof en zuurstof afsplitsen (Holladay, Hu, King, & Wang, 2009). De manier waarop deze elektriciteit wordt opgewerkt is van belang bij de mate waarin waterstof daadwerkelijk een energierevolutie zou kunnen betekenen. Indien men namelijk gebruik maakt van aardolie-, steenkool- of aardgascentrales blijft de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen bestaan.

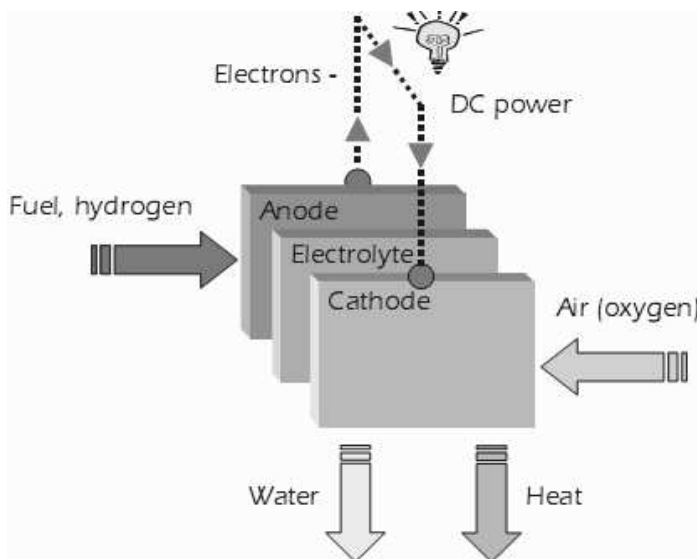
Het grote potentieel ligt echter in het gebruik van elektriciteit opgewekt uit hernieuwbare energiebronnen zoals zonnestraling, waterkracht, wind en biomassa (Clark, 2008). Een mogelijke begaanbare weg hierbij is het gebruik van kernenergie om het wisselvallige karakter van sommige hernieuwbare energiebronnen op te vangen, waardoor men aan de verwachte massale vraag naar waterstof op een milieuvriendelijke manier zou kunnen voldoen (Duffey, 2009). Naast deze meest voor de hand liggende manieren van waterstofproductie onderzoekt men ook mogelijkheden zoals biologische (via micro-organismen), foto-elektrische (rechtstreeks via zonlicht) en thermochemische (via warmte en bepaalde chemicaliën) winning van waterstof (Holladay et al., 2009). Vanwege de kosten die gepaard gaan met de energieproductie die benodigd is voor de vorming van waterstof verwacht men dat de commerciële haalbaarheid ervan nog niet voor de nabije toekomst is. Dit is zeker het geval voor de waterstof geproduceerd via 'hernieuwbare' elektrolyse van water (International Energy Agency, 2004c).

Naast het feit dat er (vooralsnog) een vrij hoge kost aan de productie van waterstof verbonden is, geeft ook de opslag ervan problemen. Vanwege zijn lage dichtheid neemt het gas veel plaats in, waardoor het moeilijk te stockeren valt (Clark et al., 2005). Zo neemt 1 gram waterstof ongeveer 11 liter plaats in bij atmosferische druk (International Energy Agency, 2004c). Hoewel waterstof een veel grotere energie-inhoud per massa-eenheid heeft dan bijvoorbeeld methaan en fossiele brandstoffen, is de volumetrische energiedichtheid ervan veel kleiner. Deze bedraagt namelijk 8700 MJ/m^3 , hetgeen overeenkomt met één derde van die van benzine (Fanchi, 2004). Hierdoor vormt vooral opslag voor gebruik in voertuigen een probleem.

Men kan de ingenomen ruimte enerzijds verkleinen door het gas onder een zeer hoge druk te brengen, waarvoor men gebruik dient te maken van hogedrukopslagtanks. Deze vorm van opslag is eerder voor grootschalig en stationair gebruik geschikt dan voor transport aangezien de tanks duur en zwaar zijn. Verder dient men er rekening mee te houden dat het samendrukken van het gas veel energie vereist (Hirscher, Lamari-Darkrim, & Sakintuna, 2007). Anderzijds kan men de stof ook compacter onder zijn vloeibare vorm opslaan. Hiervoor dient men het gas af te koelen tot -253 graden Celsius. Dit vereist opnieuw speciale materialen en daarenboven verbruikt de koeling tot 40 procent van de energie van de waterstof (Faaij & de Wit, 2007). Verder experimenteert men ook met een opslag via metaalhydrides en koolstofmaterialen. Deze stoffen absorberen de waterstof waardoor het compacter kan worden opgeslagen (Hirscher et al.). Een andere belangrijke

uitdaging voor waterstof ligt in het feit dat de introductie ervan zeer grote infrastructuurwijzigingen vereist (Faaij & de Wit).

Waterstof kan direct verbrand worden in een daarvoor speciaal aangepaste interne verbrandingsmotor. Het gebruik ervan in brandstofcellen kent echter een groter toepassingsgebied (Fanchi, 2004). Een brandstofcel is een apparaat dat waterstof en zuurstof via een elektrochemische reactie omzet in elektriciteit. Op onderstaande figuur is het werkingsprincipe van een brandstofcel op een schematische wijze weergegeven. De brandstofcel bestaat uit twee elektroden, waartussen een elektrolyt gevangen zit. Bij activering van het systeem wordt er waterstof naar de anode aangevoerd en zuurstof naar de kathode (Lee et al., 2007). Onder invloed van een katalysator splitst het waterstof zich vervolgens in elektronen en protonen. De elektronen worden via een extern circuit afgevoerd en voorzien op die manier de bestemde toepassing van elektriciteit. De protonen verplaatsen zich door het elektrolyt naar de kathode waar ze zich samenvoegen met zuurstof en elektronen en op die manier water en hitte vormen. Omdat er in de brandstofcel geen verbranding plaatsvindt, komen er dus ook (bijna) geen schadelijke uitlaatgassen vrij waardoor het een zeer milieuvriendelijk alternatief is. Brandstofcellen kunnen zowel in stationaire toepassingen zoals het verwarmen van gebouwen en het produceren van elektriciteit als voor de aandrijving van voertuigen gebruikt worden (International Energy Agency, 2004c).



Figuur 5.9: Het werkingsprincipe van een brandstofcel (International Energy Agency, 2004c, p.23)

Ondanks de vele problemen waarmee de waterstoftechnologie nog steeds kampt (het product is bovendien ook nog zeer snel ontvlambaar) wordt het toch beschouwd als een alternatief voor fossiele brandstoffen dat veel potentieel met zich meedraagt. Dit komt omdat de stof zo veelzijdig

voorkomt op aarde in tal van chemische verbindingen. Verder verbrandt waterstof zeer zuiver waardoor er enkel water (en in beperkte mate stikstofoxides) als nevenproduct vrijkomt (Fanchi, 2004). Indien men voor de aanmaak van het waterstof hernieuwbare energie gebruikt bekomt men dus een zeer milieuvriendelijke energiedrager. Ten slotte is het werkingsprincipe van waterstof als brandstof bewezen door enkele prototypes (en het gebruik in bijvoorbeeld de ruimtevaart) waardoor de technologie, mits er een oplossing wordt gevonden voor de beschreven problemen, op grote schaal kan worden ingevoerd. Zo bestaat er in Californië een uitgebreid testproject, met onder andere een waterstofsnelweg waarlangs een aantal vulstations werden aangelegd (Clark et al., 2005). Voorziene technologieverbeteringen en kostenbesparingen in de productie van elektriciteit via hernieuwbare energiebronnen kunnen dit proces versnellen.

5.6 Kernenergie

Kernenergie wordt in beperkte mate ingezet voor de aandrijving van boten, zoals onderzeeërs en vliegdekschepen. De belangrijkste toepassing ligt echter in de productie van elektriciteit (Hammad & Rashad, 2000). Wereldwijd wordt ongeveer 16 procent van de totale elektriciteitsproductie opgewerkt uit kernenergie (World Energy Council, 2007). Er zijn twee mogelijke technieken voor het opwekken van energie uit splijtstoffen. Kernfusie, waarbij atomen worden samengevoegd waardoor energie vrijkomt, is wetenschappelijk gezien mogelijk maar wordt nog niet commercieel toegepast (Sørensen, 2004). Bij het tegenwoordig gebruikte kernfissie absorbeert de splijtstof, meestal uranium, een neutron waardoor deze zich in twee delen afsplitst (Fanchi, 2004). Bij dit proces komt een grote hoeveelheid energie vrij. Die energie wordt gebruikt om stoom aan te maken die gebruikt wordt om een stoomgenerator ter productie van elektriciteit aan te drijven (Lee, Loyalka, & Speight, 2007).

Net zoals voor steenkool, aardolie en aardgas geldt ook voor kernenergie dat het niet onuitputtelijk is. De voorraden van uranium, plutonium en thorium zijn tegen het huidige verbruik en onder invloed van verbeterende technieken wel een veel langere levensduur beschoren (Hammad & Rashad, 2000). Een ander belangrijk nadeel is de radioactiviteit die inherent is aan het proces. Enerzijds brengt nucleaire productie van elektriciteit radioactief afval met zich mee dat nog gedurende zeer lange tijd actief, en dus gevaarlijk, blijft. Anderzijds is het mogelijk dat door defecten of ongelukken radioactieve materie vanuit de reactor naar de buitenwereld lekt. Een extreem voorbeeld hiervan is het ongeluk met de kernreactor van Tsjernobyl in Oekraïne (Fanchi, 2004).

Een belangrijke voordeel van nucleaire energie is de lage kost verbonden aan de elektriciteitsproductie. Verder verzekert het de energievoorziening, zeker met het oog op

afnemende en duurder wordende voorraden van fossiele brandstoffen (World Energy Council, 2007). Een derde belangrijk voordeel situeert zich op het vlak van het milieu. De uitstoot van luchtvervuilende stoffen bij elektriciteitsproductie via kernenergie ligt vele malen lager dan dat bij conventionele centrales aangedreven door aardolie, steenkool of aardgas het geval is (Abu-Khader, 2009).

5.7 Aardgas

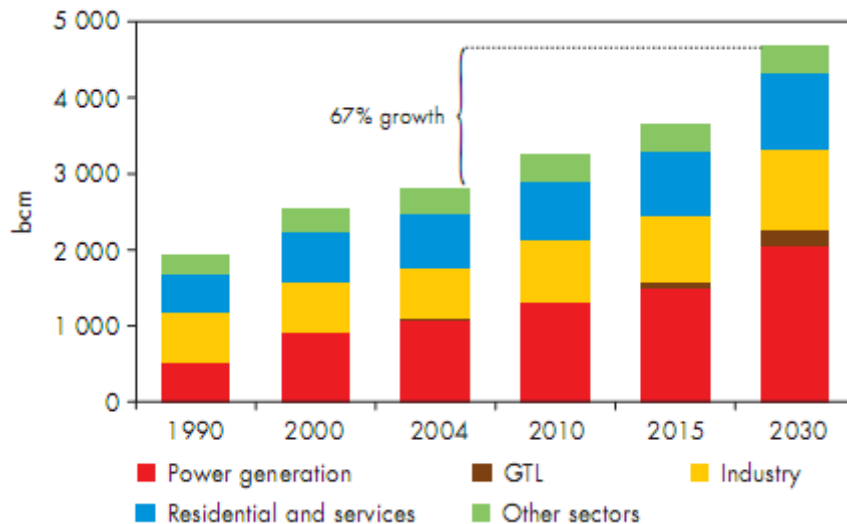
Aardgas ontstaat door de omzetting van afgestorven organisch materiaal onder hoge temperatuur en druk binnenin de aarde (Lee et al., 2007). Het is dus, net zoals aardolie, een fossiele brandstof waardoor ook de aardgasreserve niet oneindig is. Eind 2007 bedroeg deze ongeveer 177 biljoen (10^{12}) m^3 , waarvan 41,3 procent zich bevond in het Midden-Oosten (vooral Qatar en Iran) en 25,2 procent in Rusland (BP, 2008). Met het huidige productieniveau in het achterhoofd komt dit overeen met een levensduur van de totale reserves van ongeveer 60 jaar. Indien men aardgas gedeeltelijk substitueert voor aardolie neemt deze tijdsspanne vanzelfsprekend af. Daarenboven moet men er rekening mee houden dat ook voor aardgas, net zoals voor elke eindige grondstof, het principe van een piek in de productie geldt en men dus niet enkel de R/P-ratio in aanmerking dient te nemen (Hubbert, 1956). Daar tegenover staat dat er slechts sinds een relatief beperkte tijd interesse in aardgas als belangrijke energiebron bestaat waardoor de industrie dus minder matuur is dan de aardolie-industrie. Nieuwe ontdekkingen en technologische vooruitgang zijn dan ook waarschijnlijker waardoor de werkelijke reserves potentieel veel hoger kunnen liggen (World Energy Council, 2007).

Aardgas is een gasvormig product dat voornamelijk bestaat uit methaan (70 tot 90 procent). Verder komen er naast onzuiverheden (voornamelijk CO_2 , N_2 , H_2S , O_2) ook andere koolwaterstoffen zoals ethaan, propaan, butaan en pentaan in voor. Het betreft dus voornamelijk de kleinste en lichtste stoffen in de reeks van de koolwaterstoffen (Kidnay & Parrish, 2006). Aangezien de bouwstenen van aardolie binnen dezelfde categorie vallen, zij het dan meestal de zwaardere vormen, kennen beide producten een gelijkaardig toepassingsgebied (Speight, 2006).

Het verbruik van aardgas bedroeg in 2007 ongeveer 2922 miljard m^3 . Dit betekent een stijging met 30 procent in tien jaar. De energiebron vertegenwoordigt 23,8 procent van het totale wereldwijde verbruik van primaire energie en neemt daarmee de derde plaats in, na aardolie en steenkool (BP, 2008).

Een belangrijk gebruik van aardgas ligt in de productie van elektriciteit. Ongeveer één vijfde van alle elektriciteit wordt ermee opgewekt, waardoor het hiervoor in belangrijkheid enkel wordt

voorafgegaan door steenkool (International Energy Agency, 2008a). Zoals uit onderstaande figuur blijkt is meer dan één derde van het totale aardgasverbruik toe te schrijven aan elektriciteitsproductie en staat dit ook borg voor een groot deel van de waargenomen en te verwachten verbruiksstijging (International Energy Agency, 2007).



Figuur 5.10: Historisch en voorspeld gebruik van aardgas per toepassingsgebied (International Energy Agency, 2006, p. 113)

Verder wordt de energie die vrijkomt bij de verbranding van aardgas ook gebruikt in huiselijke- en commerciële toepassingen zoals het verwarmen van voedsel, ruimtes en water. Ook in de industrie kent aardgas een belangrijke rol als energiebron (International Energy Agency, 2006).

Voorts kan men aardgas ook aanwenden in de productie van vloeibare koolwaterstoffen. Dit proces wordt Gas-To-Liquids (GTL) genoemd. Op deze manier kan het gas, dat meestal op afgelegen locaties ontgonnen wordt, op een makkelijkere manier worden getransporteerd. Het grote voordeel is echter dat deze vloeibare koolwaterstoffen in de huidige infrastructuur en technologie kunnen toegepast worden (Takeshita & Yamaji, 2008). Om aardgas hiervoor te kunnen gebruiken wordt dit meestal eerst omgezet in synthesegas. Hierbij wordt het aanwezige methaan, via het toevoegen van stoom, omgezet tot een mengsel van koolstofmonoxide en waterstof. Dit mengsel kan vervolgens via verschillende processen worden omgezet tot bruikbare producten zoals petrochemische componenten maar ook zeer zuivere transportbrandstoffen. Vaak wordt hiervoor het zogenaamde Fischer-Tropschproces aangewend, waarbij men het synthesegas via een katalysator omzet tot koolwaterstofketens van geselecteerde grootte (Lee et al., 2007). Tegenwoordig wordt er ook onderzoek gedaan naar een meer energie-efficiënte directe omzetting van methaan naar vloeibare brandstoffen en chemicaliën, al blijft de indirecte methode vooralsnog de enige levensvatbare oplossing (Basu & Keshav, 2007).

Bovendien kan men aardgas ook rechtstreeks gebruiken als transportbrandstof en dit zowel in de vorm van LNG (Liquified Natural Gas) als CNG (Compressed Natural Gas), al komt dit in de praktijk weinig voor (Mokhatab, Poe, & Speight, 2006). Het aardgas wordt wel vaak in deze vorm getransporteerd waar het aanleggen van pijpleidingen te kostelijk zou zijn (Javanmardi, Moshfeghian, Najibi, Nasrifar, & Rezaei, in press)

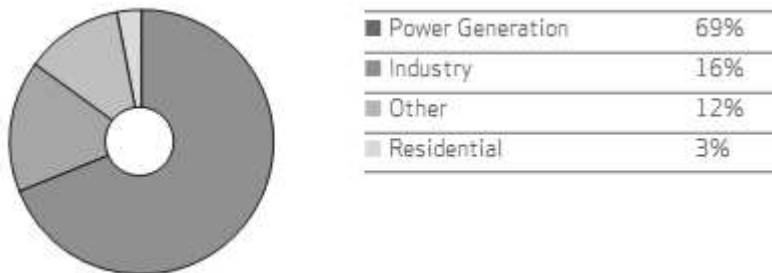
Ten slotte kan men aardgas ook gebruiken voor de productie van diverse petrochemicaliën. Het grootste bestanddeel van aardgas, methaan, kan worden omgezet tot methanol. Deze stof kan dan, net zoals de uit aardolie geproduceerde variant, worden ingezet voor de productie van bijvoorbeeld benzineadditieven, plexiglas en formaldehyde (Association of petrochemicals producers in Europe, 2005). Verder kunnen ook de iets zwaardere, maar minder voorkomende fracties zoals ethaan, propaan en butaan gebruikt worden voor de aanmaak van belangrijke chemische producten. Deze komen in essentie overeen met degene die uit de olefinengroep van aardolie kunnen gewonnen worden en kennen dus in ethyleen en propyleen hun belangrijkste vertegenwoordigers (Hatch & Matar, 2001). Ten slotte kan men, zoals eerder besproken, ook onrechtstreeks via synthesegas petrochemicaliën uit aardgas winnen (Basu & Keshav, 2007).

5.8 Steenkool

Steenkool is, naast aardolie en -gas, een fossiele en dus uitputbare brandstof. De huidige reserves van de grondstof bedragen 847,5 miljard ton. Tegen het huidige productietempo zijn deze nog goed voor ongeveer 133 jaar gebruik, wat het de fossiele brandstof maakt die nog het langst exploiteerbaar zal blijven (BP, 2008). Ook steenkool is geografisch niet gelijk verdeeld. Ongeveer 90 procent van de bewezen reserves is gelegen in acht landen, waarvan de V.S (28,6 %), Rusland (18,5 %) en China (13,5 %) het belangrijkste aandeel vertegenwoordigen (World Energy Council, 2007).

In 2007 vertegenwoordigde steenkool ongeveer 28,6 procent van het totale verbruik van primaire energie. Hiermee komt het op een tweede plaats, na aardolie (BP, 2008). Men verwacht een stijging van het verbruik van steenkool van ongeveer 65 procent tussen 2005 en 2030, waardoor het aandeel in het totaal energieverbruik licht stijgt (Energy Information Administration, 2008). De stijging is voornamelijk te wijten aan het verbruik in niet-OECD-landen, waarbij China en India het voortouw nemen. Men schat dat deze twee landen voor meer dan drie kwart van de verbruiksstijging verantwoordelijk zullen zijn (International Energy Agency, 2006). Een dergelijk vergroot gebruik van steenkool brengt echter wel problemen op het vlak van milieuvervuiling teweeg. Vanwege de grote koolstofconcentratie in de grondstof brengt de verbranding ervan, in vergelijking met de andere fossiele- en hernieuwbare brandstoffen, een grotere uitstoot van CO₂

met zich mee (Azar, Lindgren, Larson, & Möllersten, 2006). Hiervan is bewezen dat het in belangrijke mate bijdraagt tot het broeikas-effect. Dit vormt een ernstige belemmering voor het potentieel van steenkool. Technieken zoals CCS (Carbon Capture and Storage) kunnen hier wel een oplossing voor bieden. Hierbij wordt het ontstane koolstofdioxide opgevangen en vervolgens ondergronds opgeslagen, waardoor luchtvervuiling vermeden wordt (Chalmers & Gibbins, 2008).



Figuur 5.11: Wereldwijde procentuele gebruik van steenkool per toepassingsgebied (World Coal Institute, 2005, p. 40)

Wereldwijd wordt verreweg het meeste elektriciteit, namelijk ongeveer 41 procent, geproduceerd via steenkool (International Energy Agency, 2008a). Zoals op figuur 5.11 valt af te lezen, vormt dit dan ook het voornaamste gebruik van de grondstof. Men verbrandt de steenkool in een boiler, waardoor water wordt opgewarmd. Het na verloop van tijd ontstane stoom drijft vervolgens een stoomturbine aan die op zijn beurt elektriciteit genereert. Ook voor toepassingen in de industrie die stoom vereisen maakt men op vergelijkbare manier gebruik van steenkool (Miller, 2005).

Verder kent steenkool een belangrijke toepassing in de ijzer- en staalindustrie. De grondstof wordt hiervoor gecarboniseerd tot cokes (Chang, Korai, Mochida, & Sohn, 1998). Deze cokes worden vervolgens in de hoogovens gebruikt voor de productie van de metalen en vormen zo een vaak gebruikt alternatief voor aardoliecokes (World Coal Institute, 2005). Ook bij andere industriële toepassingen die hitte vereisen, zoals de productie van cement, gebruikt men steenkool. Daarnaast wordt het ook in huiselijke applicaties zoals het verwarmen van voedsel en ruimtes toegepast. Toch blijkt dit direct gebruik van de warmteopwekkende eigenschappen van steenkool, zowel voor residentieel als industrieel gebruik, beperkt (Miller, 2005).

Het is mogelijk om steenkool om te zetten tot gas door middel van CTG-processen (Coal-To-Gas). Door deze gasificatie kan de grondstof worden omgezet in een makkelijker handelbaar en zuiverder gasvormig product dat kan worden gebruikt als brandstof of als tussenproduct voor de aanmaak van andere gasvormige of vloeibare brandstoffen en chemicaliën (Miller, 2005). Afhankelijk van het soort steenkool en de processen die gebruikt worden, verkrijgt het gas een iets andere samenstelling waardoor het voor verschillende doeleinden geschikt is. Zo kan het gevormde gas gebruikt worden als brandstof in elektriciteitscentrales en in de industrie in het algemeen

(Minchener, 2005). Bovendien kan men hetzelfde proces ook inschakelen voor de productie van waterstof (Cormos, Peteves, Starr, & Tzimas, 2008). Ten slotte kan men het via de gasificatie van steenkool verkregen synthesesgas (syngas) gebruiken als voedingsbron in de chemische industrie en als tussenproduct in de aanmaak van vloeibare brandstoffen (Minchener)

Bovendien is het ook mogelijk om steenkool om te vormen tot een bruikbare vloeistof. Deze CTL-technologie (Coal-To-Liquids) werd reeds tijdens de WO II door Duitsland gebruikt om de aanvoer van aardolie en zijn afgeleide producten te verzekeren (Vallentin, 2008). Het proces is, net zoals de gasificatie van steenkool, vooral interessant voor landen die grote voorraden aan steenkool hebben maar minder toegang tot aardgas en -olie. Steenkool kan op drie manieren in een vloeibare energiedrager worden omgezet: pyrolyse, indirecte liquificatie en directe liquificatie (Miller, 2005). Bij het pyrolyseproces ontstaan vloeistoffen als bijproduct van cokes. Bij de tweede methode, indirecte liquificatie, wordt het steenkool eerst omgezet in gas via CTG-technologie. Hierna wordt dit gas via het Fischer-Tropschproces omgezet in vloeibare brandstoffen. Directe liquificatie daarentegen maakt niet gebruik van een tussenstap maar zet steenkool in een waterstofrijke omgeving rechtstreeks om in een vloeistof (Larson & Williams, 2003). Het gebruik van deze directe techniek wordt niet op commerciële schaal toegepast, in tegenstelling tot de indirecte manier die met het bedrijf Sasol in Zuid-Afrika een belangrijke producent kent. Door gebruik te maken van CTL kan steenkool een goed substituut voor aardolie vormen. De geproduceerde synthetische aardolie kan geraffineerd worden tot hoogwaardige brandstoffen en chemicaliën (Dong, Hao, Li, Yang, & Xu, 2007). Een techniek die hieraan verwant is, is de aanmaak van zogenaamde steenkoolslurrie. Hierbij wordt de steenkool fijngemalen en opgelost in een vloeistof zoals water, olie of methanol. Hierdoor ontstaat een vloeibare brandstof die gebruikt kan worden in industriële boilers en bepaalde verbrandingsmotoren (Lee et al., 2007).

Ook in de productie van chemicaliën, ten slotte, kan steenkool als voedingsbron dienen. Voor de grootschalige opkomst van op aardolie gebaseerde petrochemische bedrijven werden chemicaliën zelfs overwegend uit steenkool geproduceerd (Guthrie, 1960). Men kan op een aantal manieren chemicaliën uit steenkool winnen. Zo kan dit onrechtstreeks via de onttrekking van de benodigde stoffen na de gasificatie en liquificatie van het product gebeuren. Verder kan men ook rechtstreeks, al dan niet in combinatie met elektriciteits- of warmteproductie, chemische producten uit steenkool produceren (Schobert & Song, 2002). Steenkool kan dienen als belangrijke bron van aromatische componenten zoals benzeen, toluen en xyleen. Hiernaast kunnen ook andere nuttige chemische stoffen zoals fenol, naftaleen, fenantreen en pyreen uit de grondstof gewonnen worden. Al deze componenten kunnen vervolgens worden ingezet in de productie van ondermeer plastics, solventen en nylon (Schobert & Song, 1996). Ook op dit gebied kan steenkool dus in bepaalde gevallen een alternatief vormen voor aardolie.

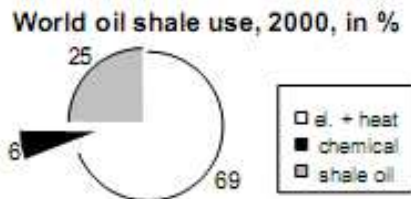
5.9 Onconventionele aardolie

5.9.1 Olieschalie

Olieschalies zijn gesteentes die relatief grote hoeveelheden organisch materiaal, met name kerogeen, bevatten (Doeglas et al., 1973). Dit kerogeen is een stof die ontstaat in het vormingsproces van aardolie, wanneer de temperatuur en druk nog niet voldoende zijn opgelopen om de vloeistof te vormen (Moran, 2006). Het potentieel van olieschalies is enorm aangezien men schat dat er wereldwijd ongeveer 2800 miljard vaten aardolie uit gewonnen kunnen worden. Het merendeel hiervan, 1500 miljard vaten, is gelegen in de Verenigde Staten (World Energy Council, 2007).

Er zijn twee methoden om olie uit olieschalies te winnen. Bij een eerste methode wordt de schalie in openlucht of in mijnen afgegraven en naar een verwerkingscentrale gebracht. Hier wordt de olieschalie verhit waardoor er uiteindelijk synthetische aardolie uit geproduceerd kan worden. Een andere techniek verhit de olieschalie rechtstreeks ondergronds waarna de vrijgekomen olie uit de bodem wordt ontgonnen (United States Congress, Office of Technology Assessment, 1980). De gewonnen aardolie kan vervolgens in raffinaderijen worden opgewerkt naar de gebruikelijke producten (Brendow, 2003). Het raffinageproces is echter wel moeilijker en dus duurder dan bij conventionele aardolie, omdat de synthetische olie meer zware componenten en onzuiverheden bevat (Lee et al., 2007). Men voorspelt dat winning van synthetische aardolie uit olieschalie bij een prijs van ruwe aardolie van ongeveer 70 tot 95 dollar (in prijzen van 2005) economisch haalbaar wordt (Bartis, Cecchine, Dixon, LaTourette, & Peterson, 2005). Bij rechtstreekse ondergrondse winning, hetgeen een hoger rendement oplevert, zou dit zelfs bij een gevoelig lagere prijs mogelijk zijn. In datzelfde rapport stellen de auteurs verder dat na ongeveer 12 jaar commerciële productie, het leereffect synthetische olie reeds bij een aardolieprijs van 35 tot 48 dollar rendabel zou kunnen maken.

Hiernaast kan olieschalie ook rechtstreeks gebruikt worden als brandstof in de elektriciteitsproductie, zoals bijvoorbeeld in Estland op grote schaal wordt toegepast (Reinsalu, Valgma, & Väli, 2008). Ook wereldwijd is dit, zoals op figuur 5.12 valt af te lezen, de belangrijkste toepassing van olieschalie (Brendow, 2003). Ten slotte is het, vanwege zijn hoge olefine- en waterstofgehalte, ook geschikt als chemische- en petrochemische voedingsbron (United States Congress, Office of Technology Assessment, 1980).



Figuur 5.12: Wereldwijde procentuele olieschalieverbruik per toepassinggebied (Brendow, 2003, p. 87)

Er zijn echter grote problemen, vooral op milieugebied, verbonden aan de productie van olie uit olieschalie. Zo zal een massale ontginning van de grondstof verregaande gevolgen hebben op het landschap. Een andere belangrijke beperking ligt in het feit dat de winning van één vat synthetische aardolie ongeveer drie vaten water verbruikt. Een adequaat wateraanvoersysteem is niet altijd beschikbaar. Indien dit wel het geval is kan een grootschalig olieschalieproject de bevoorrading van de omgeving in gevaar brengen. Ook is het risico van watervervuiling reëel (Bartis et al., 2005). Ten slotte blijkt ook de EROEI relatief laag te zijn. Dit wil zeggen dat er voor de productie van één eenheid energie meer energie vereist is bij winning van synthetische aardolie uit olieschalie dan dat bij conventionele aardolie het geval is (Cleveland, Costanza, Hall, & Kaufmann, 1984). Deze energie zal in de nabije toekomst van andere fossiele brandstoffen afkomstig zijn waardoor de exploitatie van olieschalie een grotere nadelige impact op het milieu, en het broeikaseffect in het bijzonder, zal veroorzaken (Aguilera, Eggert, Lagos, & Tilton, 2009)

5.9.2 Extra zware aardolie en oliezanden

Een tweede vorm van niet-conventionele aardolie kan men produceren uit oliezanden en extra zware aardolie. Oliezanden bestaan uit water, zand of klei en een stroperige vorm van aardolie, bitumen genaamd (Aguilera et al., 2009). Het onderscheid met extra zware aardolie bestaat erin dat deze beweegbaar is in het reservoir en de olie in oliezanden niet (Hope & Méjean, 2008). Het zijn beiden restanten van conventionele aardolie die na verloop van tijd is afgebroken, voornamelijk door bacteriële activiteit.

Deze onconventionele bronnen van aardolie bieden interessante vooruitzichten aangezien de totale verwachte hoeveelheid van beide bronnen 5 757 miljard vaten bedraagt, waarvan ongeveer 4 763 miljard vaten werkelijk ontdekt zijn. Dit komt overeen met vier tot vijf maal de bewezen voorraden van conventionele aardolie, al is slechts een fractie op dit moment reeds technisch en economisch ontginbaar (World Energy Council, 2007). Oliezanden komen in 22 landen voor, met redelijk belangrijke hoeveelheden in Rusland en Kazachstan. Veruit de belangrijkste vindplaats is echter Canada, en vooral dan de provincie Alberta, waar meer dan twee derde van alle mogelijke productie terug te vinden is. Wat Canada is voor oliezanden, is Venezuela voor extra zware

aardolie. In dit land, en dan vooral in de Orinoco-gordel, zijn quasi alle voorraden van deze niet-conventionele aardolie terug te vinden (Hope & Méjean, 2008).

De ontginning van olie uit oliezanden lijkt sterk op die uit olieschalie. Enerzijds kan men dus gebruik maken van afgraving van het oliezand. Vervolgens dient men hierbij dan een warmwaterproces in te schakelen om het bitumen te scheiden van de andere bestanddelen (Fedorak, Holowenko, & MacKinnon, 2002). Men schat dat slechts 10 tot 20 procent van de oliezanden op deze manier kan ontgonnen worden. Anderzijds kan men, voor de dieper gelegen reservoirs (vanaf 75 meter), ondergrondse ontginningstechnieken inschakelen. Hierbij kan men gebruik maken van stoominjectie om het bitumen minder stroperig en zo oppompbaar te maken. (Lee et al., 2007). Ook het injecteren van solventen kan deze ondergrondse extractie vergemakkelijken (Chung & Dai, 1995).

De productie van extra zware aardolie, daarentegen, kan voor een gedeelte eenvoudiger verlopen. Vanwege de grotere beweegbaarheid van de materie kan deze via horizontale boringen opgepompt worden. Men schat dat op deze manier tussen 8 en 12 procent van alle extra zware aardolie kan ontgonnen worden. Om de resterende olie te onttrekken dient men hierna gebruik te maken van hittetoevoegende technieken zoals stoominjectie (World Energy Council, 2007).

Vanwege de zeer gelijkaardige productiemethoden bij olieschalie treden er ook gelijkaardige problemen op bij de winning van synthetische aardolie uit deze twee onconventionele bronnen. Deze behelzen namelijk landschapsvernietiging, waterverbruik en -vervuiling, een verhoogde uitstoot van broeikasgassen en een hoge energie-intensiteit van de verwerkingsprocessen. Verder blijkt ook hier in vergelijking met conventionele aardolie een verregaandere raffinage nodig (Lee et al., 2007).

Huidige productietechnieken maken het op dit moment reeds mogelijk om op een rendabele manier synthetische aardolie te produceren uit beide onconventionele aardoliebronnen. In 2005 bedroeg de productie uit oliezanden en extra zware aardolie respectievelijk 1,1 en 0,6 miljoen vaten per dag. Hiermee maakten ze samen ongeveer 2 procent uit van de totale productie van vloeibare brandstoffen (Energy Information Administration, 2008). Schattingen van 2006 gaan ervan uit dat oliewinning uit Canadese oliezanden bij een aardolieprijs van ongeveer 30 a 35 dollar economisch haalbaar is (National Energy Board, 2006). Voor extra zware aardolie is dit zelfs bij nog lagere prijzen een feit vanwege de eenvoudigere ontginningstechniek. Het succes van deze alternatieve aardoliebronnen heeft tot gevolg dat ze in Canada en Venezuela voor meer dan één derde, respectievelijk één vijfde van de landelijke aardolieproductie verantwoordelijk zijn (World Energy Council, 2007).

5.10 Biomassa

Het gebruik van biomassa als alternatief voor fossiele brandstoffen kent de laatste jaren een sterk verhoogde aandacht. Deze biomassa kan in veel verschillende vormen voorkomen en ook voor een diversiteit aan toepassingen aangewend worden. De gemeenschappelijke noemer van al deze vormen is dat ze hun energie verkrijgen door het fotosyntheseproces (Lee et al., 2007). In dit proces worden koolstofdioxide en water via de energie uit zonnestraling omgezet in zuurstof en voor het organisme noodzakelijke suikers. Verbranding van de biomassa brengt een omgekeerde reactie op gang (Enova et al., 2007).

Biomassa wordt reeds sinds de begindagen van de mens gebruikt als energiebron. Ook nu wordt het nog vaak in vrij primitieve vorm aangewend om te voldoen aan menselijke energienoden. Zo kan het bijvoorbeeld gebruikt worden voor de verhitte van ruimtes, voedsel en water maar ook voor verlichting (World Energy Council, 2007). Hiervoor kan men bijvoorbeeld gebruik maken van hout, houtskool en gedroogd mest. Dit gebruik van biomassa kent op dit moment wereldwijd de grootste toepassing. Bovendien is bio-energie, vooral door intensief gebruik in dit toepassingsgebied, voor meer dan de helft van de wereldbevolking de meest belangrijke energiebron (Enova et al., 2007).

Verder kan biomassa ook worden ingeschakeld voor de productie van elektriciteit. Omdat bij dit proces veel warmte vrijkomt, maakt men vaak gebruik van installaties die zowel elektriciteit- als warmtetoepassingen kunnen voorzien (Brammerd et al., 2009). In het grootste deel van deze elektriciteitscentrales wordt de biomassa verbrand, waarbij de geproduceerde hitte wordt gebruikt voor de aanmaak van stoom. Dit stoom drijft vervolgens een traditionele stoomgenerator aan. Anderzijds maakt men ook gebruik van een gasificatieproces waarbij biomassa wordt omgezet tot synthesesgas dat voornamelijk bestaat uit koolstofoxide, waterstof, koolstofdioxide en methaan. Dit gas kan dan dienen als brandstof in elektriciteitsopwekkende gasturbines (Lee et al., 2007). Vaak zal elektriciteitsproductie op basis van biomassa gebeuren bij bedrijven die grote hoeveelheden verder onbruikbaar bioafval produceren, zoals papierfabrikanten. De elektriciteitsproductie dient dan om energie aan het bedrijf te voorzien en de overschot terug te geven aan het netwerk (Enova et al., 2007).

Een derde toepassing van biomassa vindt men terug in de productie van vloeibare biobrandstoffen. Deze zijn niet alleen interessant omdat ze de afhankelijkheid van aardolie kunnen verminderen, maar zijn bovendien milieuvriendelijker dan hun fossiele tegenhangers (Ariasa et al., 2008). Men kan binnen de vloeibare biobrandstoffen twee belangrijke categorieën onderscheiden: de alcoholen en biodiesels (Adamopoulos, Argyropoulos, Gaspar, & Lucia, 2006). Binnen de alcoholen kunnen zowel methanol als ethanol dienen als motorbrandstof. Het is echter vooral ethanol dat in de

praktijk een toepassing kent, ondermeer omdat methanol corrosiever is en bijgevolg minder goed in bestaande installaties gebruikt zou kunnen worden (Enova et al., 2007).

Ethanol kan geproduceerd worden uit biologische producten die voldoende suikers of materialen die kunnen worden omgezet tot suikers, zoals zetmeel en cellulose, bevatten. Goede kandidaten zijn onder andere suikerriet, suikerbieten, maïs en tarwe (International Energy Agency, 2004b). De bruikbare stoffen uit deze planten worden via bacteriën, schimmels en enzymen, via een proces dat fermentatie wordt genoemd, omgezet in ethanol. Bioethanol wordt vaak als additief gemengd met benzine, waardoor het niet alleen de afhankelijkheid van aardolie verkleint maar bovendien het octaangehalte van de brandstof verhoogd en de uitstoot van schadelijke stoffen verlaagd. Vaak bestaat het mengsel van benzine en bioethanol uit ongeveer tien procent ethanol omdat te hoge concentraties van het product niet compatibel zijn met conventionele verbrandingsmotoren. Er is echter gespecialiseerde technologie op de markt die aandrijving op basis van de brandstof E85, met een ethanolgehalte van 85 procent, mogelijk maakt (Enova et al., 2007). In de markt van bioethanol zijn de Verenigde Staten en Brazilië veruit de belangrijkste wereldspelers (World Energy Council, 2007).

Biodiesel is een tweede belangrijke vloeibare brandstof die uit biomassa kan geproduceerd worden. Biodiesel kan in zijn pure vorm gebruikt worden in daarvoor ontworpen motoren, maar kent vaker zijn toepassing in een mengsel met conventionele diesel. Vaak wordt dit mengsel voor 5 tot 20 procent gevormd door de biologische vorm. Tegenwoordig wordt de meeste biodiesel geproduceerd in enkele grote Europese landen (Duitsland, Italië, Frankrijk) en de Verenigde Staten (World Energy Council, 2007). Hierbij gebruikt men een proces waarbij een biologische olie of vet een chemische reactie aangaat met methanol en een katalysator (Demirbas, 2007). Dit veresteringsproces leidt tot de vorming van biodiesel in de vorm van vetzuurmethylesters (FAME). Als voedingsstroom kan zowel plantaardige olie (soja, zonnebloem, koolzaad,...), gebruikt frituurvet als dierlijk vet (rund, kip, varken,...) gebruikt worden (Adamopoulos et al., 2006). Ten slotte kan men het door gasificatie van biomassa ontstane synthesesgas gebruiken in de productie van onder andere transportbrandstoffen. Ook hier kan men dit gas via het Fisher-Tropschproces omzetten in bruikbare producten. Deze techniek noemt men ook wel Biomass-To-Liquids (BTL).

Een vierde toepassing van biomassa kan men terugvinden in de productie van biogas. Dit gas komt vrij door de vergisting van biologisch materiaal zoals mest, stortafval en rioolslib. Het proces voltrekt zich bijvoorbeeld automatisch op stortplaatsen en waterzuiveringsinstallaties. Het gevormde gas bestaat voornamelijk uit methaan en koolstofdioxide (da Rosa, 2005). Hierdoor kan het direct verbrand worden ter productie van hitte, maar ook na zuivering worden gebruikt als synthetisch aardgas (Enova et al., 2007).

Een laatste belang gebruik van biomassa ligt in de aanmaak van chemische producten. Tot het einde van de 19^{de} eeuw was dit zelfs de belangrijkste grondstof hiervoor. De opkomst van fossiele tegenhangers bracht biomassa echter snel op de achtergrond (Klass, 1998). Tegenwoordig krijgt het echter ook in dit toepassingsgebied vernieuwde aandacht. Hierbinnen zijn drie pistes mogelijk. Ten eerste kan men uit biomassa bestaande chemicaliën produceren. Daarnaast vallen binnen deze categorie ook in de natuur voorkomen chemicaliën waaronder bijvoorbeeld biopolymeren zoals cellulose. Ten slotte is het ook mogelijk om nieuwe, specifieke biochemicaliën te creëren (van Haveren, Sanders, & Scott, 2007). Het voordeel van deze laatste categorie is dat men hierbij het meest efficiënt gebruik maakt van de eigenschappen van het biologisch product. Verder is het ook mogelijk om nieuwe applicaties te ontwikkelen die via de conventionele petrochemie niet mogelijk zijn. Het nadeel is echter dat de kapitaalkosten verbonden aan de ontwikkeling ervan hoog zijn en dat de markten ervoor nog niet voldoende ontwikkeld zijn. In bijlage 4 is een overzicht van de belangrijkste en meest beloftevolle biochemicaliën terug te vinden. Zoals uit deze figuur valt af te leiden kunnen de afgeleide producten vaak dienen als alternatieven voor aardolieafgeleiden. Voorbeelden hiervan zijn toepassingen als solventen, brandstofadditieven, plastics, verven, textielvezels en smeermiddelen (National Renewable Energy Laboratory & Pacific Northwest National Laboratory, 2004).

Op de korte tot middellange termijn wordt de meeste impact toegedicht aan biochemicaliën met dezelfde chemische structuur als vaakgebruikte conventionele chemicaliën (van Haveren et al., 2007). Deze kunnen namelijk in de huidige infrastructuur worden ingezet voor bijvoorbeeld de productie van plastics. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om ethyleen, het belangrijkste petrochemische product, uit bioethanol te produceren. Op vergelijkbare manier zou propyleen uit biopropanol kunnen worden geproduceerd, al is dit op dit moment nog niet op grote schaal mogelijk. De productie van aromaten uit biomassa staat nog in zijn kinderschoenen en zal naar verwachting de eerste twintig tot dertig jaar vrij beperkt blijven. Verder kan biomethanol dienen als vervanger van methanol dat bekomen wordt uit aardolie en aardgas (Doğu & Varışli, 2007). Bovendien kunnen ook een heel aantal andere intermediaire chemicaliën zoals acrylzuur, acrylonitril, aceton en isopropanol op een vrij eenvoudige wijze uit biomassa geproduceerd worden (van Haveren et al., 2007).

Ten slotte is het ook via de omzetting van biomassa tot synthesegas mogelijk om chemicaliën te produceren. De hierbij geproduceerde koolwaterstoffen kunnen vervolgens worden omgevormd tot de verschillende chemische producten en afgeleiden, net zoals dat bijvoorbeeld bij steenkool het geval is (Klass, 1998). Biochemicaliën kunnen dus voor een brede waaier aan producten een alternatief bieden voor aardolieafgeleiden. Men schat dat tegen 2030 ongeveer 25 procent en uiteindelijk tot zelfs twee derde van de totale chemische industrie gebaseerd zou kunnen zijn op hernieuwbare biologische bronnen (Ali et al., 2005).

Ondanks het grote potentieel van biomassa zijn ook aan dit alternatief enkele nadelen verbonden. Zo blijkt de huidige kost van vloeibare biobrandstoffen in ontwikkelde landen twee tot drie maal groter dan die van benzine en diesel. In sommige ontwikkelingslanden, zoals Brazilië, blijken ze wel (bijna) competitief ten opzichte van geïmporteerde aardolieafgeleiden (International Energy Agency, 2004b). Bovendien kunnen er ook op milieuvlak problemen optreden. Zo zal een doorgedreven gebruik van biomassa een impact hebben op het landgebruik. Er zullen grote oppervlaktes nodig zijn voor de teelt van energierijke gewassen, hetgeen ontbossing en verlies van habitat voor bepaalde dier- en plantensoorten tot gevolg kan hebben (Guardabassi & Goldemberg, 2009). Bovendien is een dergelijk grondgebruik in dichtbevolkte landen gewoonweg niet mogelijk, waardoor het potentieel van biomassa in die landen sterk belemmerd wordt. Ten slotte vreest men dat wanneer er een concurrentiestrijd ontstaat tussen het gebruik van bepaalde plantensoorten als voedsel of energiebron, dit een negatief gevolg kan hebben voor de voedselzekerheid van vooral de armsten der aarde (Senauer, 2008).

5.11 Conclusie

Zoals uit voorgaande discussie en tabel 5.1 blijkt, bestaan er een aantal alternatieven die de afhankelijkheid van aardolie en de gevolgen van piekolie kunnen verminderen. Hierbij valt op dat het merendeel van deze alternatieve energiebronnen een gebruik kent in de aanmaak van elektriciteit. De impact hiervan op het aardolieverbruik zal echter vrij beperkt zijn, aangezien slechts ongeveer 6% van de totale geproduceerde hoeveelheid aardolie wordt aangewend in de elektriciteitsproductie (International Energy Agency, 2008a). Ook op het gebied van warmtetoepassingen bestaan er een aantal interessante alternatieven. Hier merkt men dan ook een geleidelijke vervanging door vooral aardgas, maar ook hernieuwbare alternatieven, op. In de jaren '80 was deze verschuiving reeds duidelijk, met een sterke daling in de vraag naar huisbrandolie (Parra, 2004). In de periode 1973-1998 bleek dan ook dat het verbruik van aardolie in residentiële en commerciële gebouwen met respectievelijk 40 en 50 procent afnam (International Energy Agency, 2004d). Een neerwaartse trend zal naar verwachting ook in de toekomst op te tekenen vallen (International Energy Agency, 2008b). Aangezien het aardolieverbruik in deze andere sectoren ongeveer 13,5 procent van het totale eindverbruik bedraagt is hier enige winst mogelijk, al moet men er natuurlijk wel rekening mee houden dat hierin een gedeeltelijke dubbeltelling van elektriciteitsproductie vervat zit. Ook het gebruik van aardolie als energiebron in de industrie kent op vergelijkbare manier mogelijkheden ter vervanging. Het is dan ook vooral op het vlak van stationaire toepassingen, zoals het verwarmen van ruimtes en water, dat er concurrentiële alternatieven voor aardolie bestaan (International Energy Agency, 2008b).

Tabel 5.1: Alternatieven voor aardolie en hun belangrijkste toepassingsgebieden (eigen opmaak)

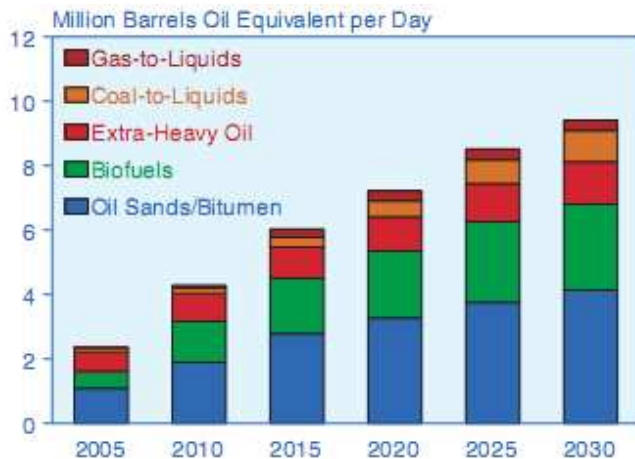
Alternatief	Belangrijkste toepassingsgebieden
Waterkracht	Elektriciteit
Geothermische energie	Elektriciteit, warmtetoepassingen
Windenergie	Elektriciteit
Zonne-energie	Elektriciteit, warmtetoepassingen
Waterstof	Elektriciteit, warmtetoepassingen, transportbrandstoffen
Kernenergie	Elektriciteit
Aardgas	Elektriciteit, warmtetoepassingen, transportbrandstoffen, petrochemie
Steenkool	Elektriciteit, warmtetoepassingen, transportbrandstoffen, petrochemie
Onconventionele aardolie	
Olieschalie	Elektriciteit, warmtetoepassingen, transportbrandstoffen, petrochemie
Oliezanden en extra zware aardolie	Elektriciteit, warmtetoepassingen, transportbrandstoffen, petrochemie
Biomassa	Elektriciteit, warmtetoepassingen, transportbrandstoffen, petrochemie

Wat betreft de niet-energietoepassingen van aardolie kan men stellen dat ook hiervoor een aantal alternatieven terug te vinden zijn. Zo kan men bijvoorbeeld rechtstreeks smeeroliën uit biologisch materiaal en cokes uit steenkool produceren. Anderzijds kunnen deze niet-energiegerichte producten ook uit synthetische aardolie, die bijvoorbeeld uit aardgas, steenkool, biomassa, olieschalie en oliezanden wordt gewonnen, vervaardigd worden. Ook petrochemicaliën kunnen via een aantal alternatieve voedingsbronnen aangemaakt worden. Aardgas en biomassa zijn hiervan belangrijke voorbeelden, maar ook steenkool en onconventionele aardolie kunnen hier dienst voor doen.

Zoals reeds in hoofdstuk 4 van deze masterproef duidelijk werd, ligt het voornaamste gebruik van aardolie echter in diverse transportdoeleinden en zal het belang hiervan enkel maar toenemen (International Energy Agency, 2008b). Het is dan ook in dit toepassingsgebied dat het belang van mogelijk alternatieven het grootst is. Ook Hirsch et al. (2005) stellen dat het pieken van de aardolieproductie niet zozeer een energiecrisis zal teweegbrengen, maar wel een probleem op het vlak van vloeibare (transport)brandstoffen. Bovendien merken ze op dat de huidige transportinfrastructuur bijna volledig is afgestemd op aardolieafgeleiden. Deze op korte termijn vervangen zou dan ook enorme kosten met zich meebrengen.

Vandaar dat alternatieven die compatibel zijn met de conventionele voertuigen en installaties de interessantste vooruitzichten bieden (Gielen & Unander, 2005). Zij kunnen een overgangsfase vormen en zo de gevolgen van een piek in de conventionele aardolieproductie enigszins opvangen (Ball & Wietschel, 2009). Toch mag dit slechts een tussenstap zijn naar een werkelijke energierevolutie, bijvoorbeeld gebaseerd op waterstof. Zoals uit figuur 5.13 blijkt, verwacht men dat het belang van alternatieve transportvloeistoffen die gebruikt kunnen worden in de huidige infrastructuur in de nabije toekomst gestaag zal toenemen. Vooral aan de (Canadese) oliezanden,

biobrandstoffen en extra zware aardolie wordt een grote rol toegedicht. De productie van synthetische brandstoffen op basis van steenkool en aardgas komt later op gang en is bovendien minder uitgesproken van belang. Het belang van al deze alternatieve transportvloeistoffen zal naar verwachting stijgen tot een aandeel van ongeveer 9 procent in het totale aardolieverbruik in 2030 (Energy Information Administration, 2008).



Figuur 5.13: Huidige en verwachte productie van alternatieve transportvloeistoffen (Energy Information Administration, 2008, p. 24)

Alternatieven die een grote of volledige aanpassing van de huidige infrastructuur vergen, daarentegen, blijken op korte termijn moeilijk implementeerbaar. Zo is waterstof voor velen dé oplossing van de energieproblematiek (Bustnes et al., 2005). Zij zien de wereld na het aardolietijdperk het waterstoftijdperk ingaan. Toch blijkt dit vooralsnog toekomstmuziek. Waterstof is op dit moment economisch niet rendabel en zal dit naar verwachting de eerstkomende decennia ook niet worden (Baillie et al., 2009). Hiervoor is de productie, maar vooral de opslag en toelevering ervan nog te problematisch en te duur. Ook elektrische voertuigen brengen geen soelaas. De batterijen van voertuigen die op het elektrisch net dienen te worden aangesloten kunnen slechts een zeer beperkte actieradius garanderen en zijn bovendien erg duur (Husain, 2003). Hybride voertuigen, die zowel van een elektrische als een verbrandingsmotor zijn voorzien, bieden wel reeds commerciële toepassingen. Een bekend voorbeeld hiervan is de Toyota Prius. De hogere aankoop prijs in vergelijking met conventionele voertuigen wordt hierbij na voldoende kilometers gecompenseerd door een lager verbruik dat kan oplopen tot meer dan 25 procent (Halgamuge, Manzie, & Watson, 2007).

Van groot belang bij de haalbaarheid van de alternatieven is de aardolieprijs. Hoe hoger deze is, hoe aantrekkelijker de verschillende alternatieve technieken zijn. Zo blijkt dat voor vele van deze alternatieven geldt dat een aanhoudende prijs van boven de 60 tot 70 dollar nodig is om ze levensvatbaar te maken voor gebruik op grote schaal (Ball & Wietschel, 2009). De hoge prijs van

de afgelopen jaren, in het bijzonder na medio 2007, wakkerde het onderzoek naar en de toepassing van de diverse alternatieven dus aan (International Energy Agency, 2008b). De scherpe daling van de aardolieprijzen sinds juli 2008, in combinatie met een wereldwijde economische crisis, vormt echter een reëel gevaar voor de ontwikkeling van alternatieven (Solnik, 2008). Ook na beide oliecrisissen stortte de ontwikkeling van alternatieven voor aardolie, die op gang kwam vanwege de hoge prijs veroorzaakt door de crisissen, in (Parra, 2004).

Vele van de voorgenoemde alternatieven zijn onder de huidige marktomstandigheden niet competitief ten opzichte van hun respectievelijke fossiele tegenhangers. Daarom is er voor regeringen een belangrijke rol weggelegd. Enerzijds kunnen ze door subsidies en investeringen aan bepaalde bedrijven toe te kennen het onderzoek naar duurzame alternatieven aanmoedigen (Blanchette, 2008). Anderzijds kunnen ook verschillende fiscale maatregelen het gebruik van bepaalde brandstoffen aan- of ontmoedigen. Zo pleiten sommige auteurs voor het invoeren van (hogere) CO₂-taksen (Johansson, 1999). Hierdoor zouden milieuvriendelijke alternatieven zoals biobrandstoffen, windenergie, zonne-energie en waterstof economisch rendabeler worden.

Hoofdstuk 6: Implementatie van de alternatieven

In dit hoofdstuk van deze masterproef wordt onderzocht in welke mate de mogelijke alternatieven voor aardolie, zoals uitvoerig beschreven in hoofdstuk 5, daadwerkelijk worden onderzocht en toegepast. Hiervoor zal eerst kort teruggekeken worden naar de implementatie in het verleden, met bijzondere aandacht voor de gevolgen van beide oliecrisisen op de investeringen in alternatieven. Daarna wordt een analyse gemaakt van de huidige stand van zaken op het gebied van alternatieven voor aardolie. Meer bepaald wordt er een antwoord gezocht op kwesties zoals wie (welke bedrijven en overheden) in alternatieven investeert en welke alternatieven het meeste aandacht van hen krijgen. Het sluitstuk van dit hoofdstuk wordt gevormd door een gevalstudie bij Royal DSM N.V. Hierbij zal worden nagegaan welke stappen door het chemieconcern worden genomen in het ontwikkelen van aardoliealternatieven met de problematiek van piekolie in het achterhoofd. Bijzondere aandacht wordt hierbij besteed aan witte (of industriële) biotechnologie.

6.1 Implementatie van de alternatieven in het verleden

Nu duidelijk is welke alternatieven voor aardolie er bestaan kan men zich de vraag stellen welke bedrijven hier hun heil in zoeken. Zoals uit bijlage 5, waarin een korte economische geschiedenis van aardolie wordt geschetst, blijkt werd het midden van de jaren '70 gekenmerkt door een vergrootte interesse voor substituten voor aardolie. Parra (2004) geeft aan dat de grote aardoliemaatschappijen op dat moment ten gevolge van de felle aardolieprijsstijgingen over aanzienlijke hoeveelheden liquiditeiten beschikten. De maatschappijen gebruikten dit geld om te diversifiëren in andere activiteiten, waaronder in eerste instantie chemicaliën en steenkool. Later investeerde men naast steenkool ook in andere energievormen zoals olieschalie, extra zware aardolie, oliezanden en nucleaire energie. Ook hernieuwbare bronnen van energie, en in het bijzonder zonne-energie, kregen verhoogde aandacht al bleef het geïnvesteerde bedrag hierin meestal beperkt. De oliecrisis, gekenmerkt door hoge prijzen en aanvoeronzekerheid, wakkerde ook de interesse van overheden voor alternatieven die de afhankelijkheid van aardolie konden verminderen aan. Westerse landen en vooral de Verenigde Staten voelden zich bedreigd door de macht van de OPEC en startten programma's voor de ontwikkeling van diverse alternatieven. Olieschalie, steenkool, geothermische- en nucleaire energie werden door de regering Nixon een belangrijkere rol toegedicht.

De sterke terugval van de aardolieprijzen na de twee oliecrisisen zorgde ervoor dat de interesse in deze dure alternatieven echter erg terugviel. Ook ontstond er enige rust op de markt waardoor het toeleveringsrisico afnam (Venn, 2002). Dit had tot gevolg dat na deze periode, op waterkracht na,

alternatieve energiebronnen geen rol van betekenis speelden in de globale energievoorziening. Verschillende kerncentrales, installaties voor de gasificatie en liquificatie van steenkool maar ook olieschalie- en oliezandprojecten werden geschrapt. Ook brandstofcellen, zonne-energie, biomassa en windenergie beleefden moeilijke tijden. Het werd voor regeringen steeds moeilijker om subsidies te rechtvaardigen, al bleven bepaalde projecten zoals bijvoorbeeld de productie van bioethanol in de VS en Brazilië wel overheidssteun genieten. Ook de grote oliemaatschappijen verlieten het pad van de diversificatie en concentreerden zich op hun kernactiviteiten: olie, gas en chemicaliën. Andere activiteiten werden afgestoten waardoor ze hoogstens marginaal in belangrijkheid binnen deze bedrijven werden (Parra, 2004).

6.2 Huidige implementatie van de alternatieven

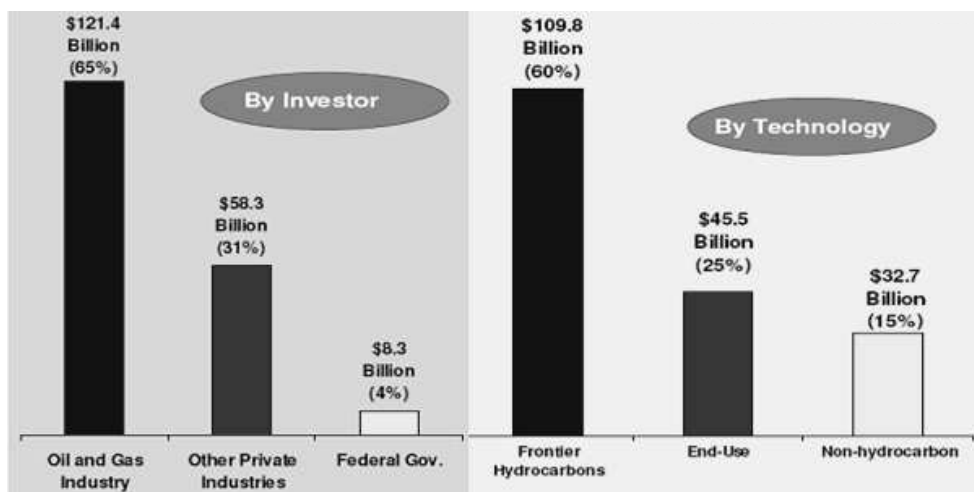
Een recent uitgebreid onderzoek schetst een overzichtelijk beeld van de investeringen in alternatieve energiebronnen (voor aardolie en -gas) in Noord-Amerika. Hierbij gaan Foss, Tanton en Volkov (2008) zowel in op welke hoeveelheden geld er in welke technologieën wordt geïnvesteerd, als op wie deze investeringen uitvoert. In het kader van het onderzoek van deze masterproef zal worden aangenomen dat de beschreven resultaten voor Noord-Amerika vertaalbaar zijn naar de algemene globale situatie. Deze assumptie lijkt vrij veilig gemaakt te kunnen worden aangezien vele grote oliemaatschappijen in Noord-Amerika gevestigd zijn (bijvoorbeeld Exxon Mobil, Chevron & ConocoPhillips), en de regio op het gebied van onderzoek en ontwikkeling op een volwassen niveau opereert. De bekomen resultaten dienen weliswaar niet beschouwd te worden als weergave van de absolute verhoudingsgewijze inspanningen, maar bieden dus wel een goed algemeen inzicht in de wereldwijde situatie op dit vlak.

Uit het onderzoek blijkt dat de Amerikaanse overheid en bedrijven opererend in de Verenigde Staten tussen 2000 en 2007 ongeveer 188 miljard dollar in alternatieve energiebronnen hebben geïnvesteerd. Hiermee blijken deze investeringen groter dan in welke periode ook daarvoor. De Amerikaanse olie- en gasindustrie heeft hier met 121,4 miljard dollar (65 %) een groot aandeel in. De andere private industrieën volgen met 58,3 miljard dollar of een aandeel van 31 procent. De overige vier procent (8,3 miljard dollar) bestaat uit uitgaven van de federale overheid. Indien men hier lokale en staatsgebonden investeringen aan zou toevoegen zouden de publieke investeringen in alternatieve energiebronnen met ongeveer twee miljard dollar stijgen.

Uit figuur 6.1 valt af te leiden welke technologieën als meest beloftevol worden gezien door de verschillende partijen. Hierbij valt het grote overwicht van de vernieuwende koolwaterstoffen op. Onder deze categorie valt de winning van synthetische aardolie uit olieschalie, oliezanden en extra

zware aardolie maar ook technieken zoals CTL, GTL en LNG. Voorts werd ongeveer een kwart van de investeringen gewijd aan vernieuwingen in het eindgebruik van energie. Hiertoe behoren cogeneratietechnieken van elektriciteit en warmte, brandstofcellen en geavanceerde voertuigtechnologieën zoals bijvoorbeeld hybride wagens. Onder de niet-koolwaterstoffen ten slotte klasseren de auteurs energiebronnen die niet van fossiele oorsprong zijn waaronder kernenergie maar ook enkele hernieuwbare energiebronnen zoals biomassa en zonne-, wind- en geothermische energie. De algemene conclusie die hierbij gemaakt kan worden is dat de grootste investeringen in alternatieve energiebronnen door de olie- en gasmaatschappijen uitgevoerd worden en dat in het algemeen vernieuwende koolwaterstoffen de grootste populariteit genieten (Foss et al., 2008).

Deze algemene conclusie blijkt geen toeval te zijn. In de periode 2000-2007 bedroeg de investering van de olie- en gasmaatschappijen in deze vernieuwende koolwaterstoffen namelijk 103,9 miljard dollar. Dit komt overeen met 86 procent van hun totale investering in die periode (en bijna 95 procent van de totale investering in vernieuwende koolwaterstoffen). De aardolie-industrie trekt dus voluit de kaart van de koolwaterstoffen in de ontwikkeling van alternatieve energiebronnen (Foss et al., 2008). Dit is logisch aangezien de productie van koolwaterstoffen en de omvorming ervan tot hoogwaardige producten tot hun kerncompetenties behoort. Deze nieuwe technieken (GTL, olieschalie, oliezanden,...) kunnen dan ook gezien worden als uitbreidingen op hun expertise.



Figuur 6.1: investeringen in alternatieve energiebronnen ingedeeld per investeerder en per technologie (Foss, Tanton, & Volkov, 2008)

Voorts blijkt dat naast investeringen, ook R&D het vaakst is toegespitst op conventionele en alternatieve koolwaterstoffen (Innovation Norway, 2007). Esmundo en Schilling (2009) komen tot de conclusie dat het voor oliemaatschappijen een rationele beslissing is om te investeren in technieken die gebruik maken van fossiele brandstoffen aangezien hun strategische posities en

omvangrijke activa hierop zijn afgestemd. Toch stellen ze dat het ook voor deze bedrijven interessant is om te investeren in een overgang naar hernieuwbare energie om te voorkomen dat ze een slachtoffer worden van disruptieve technologieën (bijvoorbeeld waterstof). Deze zouden namelijk een ernstige bedreiging voor hun voortbestaan betekenen.

Een nader onderzoek naar de activiteiten van de vijf grootste oliemaatschappijen qua omzet, met name Exxon Mobil, Royal Dutch Shell, BP, Total en Chevron, brengt dezelfde inzichten aan het licht (Financial Times, 2008). Al deze bedrijven nemen in een of andere vorm posities in op de markt van alternatieve en hernieuwbare energie. Zo geeft Total blijk van investeringen in onder andere kern-, zonne-, wind- en oceaanenergie maar ook in steenkool, synthetische aardolie (GTL, CTL, BTL), biobrandstoffen en waterstof (Total, 2007). Ook Shell toont aan dat het investeert in projecten op het gebied van alternatieve energiebronnen zoals zonne-energie, windenergie, biobrandstoffen, waterstof en synthetische aardolie via GTL (Royal Dutch Shell, 2007). Bij BP en Chevron kan men vergelijkbare verklaringen ontwaren (BP, 2007 & Chevron, z.d.).

Nader onderzoek van de verklaringen geeft echter aan dat de investeringen vaak slechts piloot- en andere kleinschalige projecten of (minderheids)aandeelhouderschap in andere bedrijven betreffen. Zo neemt Total bijvoorbeeld een 10, respectievelijk 21,5 % aandeel in twee pilootprojecten rond oceaanenergie en heeft het twee waterstoftankstations geopend (Total, 2007). Ook BP en Royal Dutch Shell, twee van de oliemaatschappijen die het hardst hebben gewerkt op het vlak van alternatieve energiebronnen, blijken er al bij al slechts een beperkt strategisch belang aan toe te dichten (Herron, 2009). Zo investeerde BP tussen 2005 en 2008 ongeveer 3 miljard dollar in alternatieve energie. Dit aanzienlijke bedrag vormde in die periode echter slechts 4,2 procent van de totale investeringen van het bedrijf, hetgeen aangeeft dat hun investeringsbeleid toch vooral gericht is op aardoliegebaseerde technieken. Shell spendeerde in dezelfde periode ongeveer 1,5 miljard dollar aan investeringen in alternatieve technologieën. Dit komt overeen met slechts 1,5 procent van hun totale investeringen. Ook als men deze cijfers relateert aan de nettowinst in 2008 van beide bedrijven, die respectievelijk 20,85 en 31,33 miljard dollar bedraagt voor BP en Shell, blijkt dit investeringsbedrag vrij beperkt (Financial Times, 2008). Ondanks dat deze bedrijven tot de grootste producenten van zonne- en windenergie ter wereld behoren blijkt verder dat in vergelijking met hun olie- en gasproductie de dagelijkse productie van hun hernieuwbare energie meer dan duizend maal kleiner blijft. Van een doorgedreven strategische omvorming richting hernieuwbare energiebronnen is dus (voorlopig) geen sprake. Bovendien stelt Herron (2009) dat de bedrijven vanwege de economische crisis hun R&D en investeringsbudgetten voor hernieuwbare technologieën drastisch hebben teruggeschoefd. Ten slotte valt bij verschillende bedrijven op te merken dat alternatieve fossiele brandstoffen, zoals degene die bekomen worden uit oliezanden, wel een vrij grote omvang aannemen (Royal Dutch Shell, 2009 & ExxonMobil, 2009).

Indien men kijkt naar de andere private bedrijven binnen de Verenigde Staten komt uit het onderzoek van Foss et al. (2009) naar voren dat zij de vernieuwende koolwaterstoffen net links laten liggen (4%). De investeringen in vernieuwingen in het eindgebruik van energie en in niet-koolwaterstoffen zijn wel aanzienlijk en bedragen beiden 28 miljard dollar. Dit komt overeen met telkens 48 procent van de totale uitgaven aan alternatieve energiebronnen van de andere private bedrijven. Op vlak van het eindgebruik blijken vooral de autofabrikanten het belangrijkste, met belangrijke investeringen in geavanceerde voertuigtechnologieën. Op het vlak van de niet-koolwaterstoffen worden belangrijke investeringen gedaan door landbouwbedrijven (biomassa), elektriciteitsproducenten en productieondernemingen (zonne- en windenergie). Esmundo en Schilling (2009) stellen in dit verband dat nieuwe toetreders tot de energie-industrie grotere voordelen halen uit investeringen in technologieën die geen fossiele brandstoffen gebruiken, en dan vooral in wind- en geothermische energie.

De overheidsbestedingen zijn meer gediversifieerd, met investeringen in elk van de besproken technologieën. De grootste aandacht gaat naar vernieuwende koolwaterstoffen (44 %), gevolgd door niet-koolwaterstoffen (36 %) en vernieuwingen op het vlak van eindgebruik (20 %). Foss et al. (2008) merken op dat ondanks het feit dat de grootte van deze investeringen vrij beperkt is, de overheid toch een belangrijke invloed kan hebben door als aantrekkingskracht voor private investeringen te dienen.

Kaufmann en Schiers (2008), ten slotte, breien aan bovenstaande literatuur een interessante toevoeging vast. In hun werk stellen ze dat er een verband is tussen het tijdstip van de verwachte piek in de aardolieproductie en de bereidheid van bedrijven om in alternatieven te investeren. Zij concluderen met name dat de onzekerheid met betrekking tot het exacte moment waarop de globale aardolieproductie zijn maximum bereikt er toe leidt dat er een asymmetrie optreedt in het investeringsprogramma dat het meeste nut oplevert voor de maatschappij, respectievelijk de bedrijven. De maatschappij zal namelijk verkiezen dat alternatieve brandstoffen beschikbaar zijn vóór het optreden van de piek, terwijl voor bedrijven het omgekeerde waar is. Indien alternatieve brandstoffen reeds voor het optreden van de piek ten volle ontwikkeld worden, moeten zij nog sterker wedijveren met de traditionele fossiele brandstoffen waardoor de opbrengsten ervan lager zullen uitvallen. Bedrijven zullen deze situatie dus willen vermijden. Indien de piek echter eerder dan verwacht optreedt, en alternatieven nog niet voldoende beschikbaar zijn, ontstaan er negatieve gevolgen voor de hele samenleving. Het tekort aan brandstoffen en de prijsstijgingen ervan zullen de totale sociale welvaart verminderen. Deze asymmetrische voorkeuren ten gevolge van de onzekerheid rond het tijdstip van het pieken van de aardolieproductie zal het voor de markt moeilijk maken om de overgang van fossiele naar hernieuwbare brandstoffen vloeiend te laten verlopen. De auteurs halen dan ook aan dat overheidsinterventie in dit verband noodzakelijk is.

6.3 Gevalstudie : DSM

6.3.1 Beschrijving bedrijf

DSM, of voluit Royal DSM N.V., startte oorspronkelijk als een mijnbedrijf in het zuiden van Nederland. Na de sluiting van de mijnen kende het een omvorming naar een vooraanstaande biotechnologie- en chemieonderneming. Het is tegenwoordig een belangrijke speler op de markt van de Life Sciences en Material Sciences, getuige een marktleiderschap in drie vierde van hun lopende activiteiten (Royal DSM N.V., 2008a). Binnen deze twee grote deeldomeinen die in feite als doel hebben de levenskwaliteit van de mens te vergroten, legt DSM zich specifiek toe op een vijftal kerngebieden. Deze vijf strategische pijlers van het bedrijf zijn op figuur 6.2 terug te vinden.

Een eerste belangrijke pijler of afdeling binnen DSM is Nutrition. Deze tak van het bedrijf produceert producten die wereldwijd worden afgenomen door producenten van voedingsmiddelen, dranken, diervoeders, persoonlijke verzorgingsproducten en geur- en smaakstoffen (Royal DSM N.V., 2008e). Voorbeelden hiervan zijn vitamines en voedingsenzymen (Royal DSM N.V., 2008a).

Een tweede strategisch cluster wordt aangeduid als Pharma. Deze tak levert producten aan de farmaceutische- en biotechnologiesector en is hierin één van de belangrijkste onafhankelijke leveranciers. Maar liefst 40 procent van de meest verkochte medicijnen in de wereld bevatten componenten die door DSM zijn aangeleverd.



Figuur 6.2: Organigram van DSM (Royal DSM N.V., 2008f, p.5)

Een derde belangrijke tak is de Performance Materials afdeling. Deze vertakking produceert een variëteit aan hoogwaardige producten zoals plastics, kunstvezels en harsen die in een veelvoud van toepassingen kunnen ingezet worden. Hun klanten kunnen bijvoorbeeld worden teruggevonden in de auto-, luchtvaart-, verf-, elektronica, textiel- en windmolenindustrie.

Polymer Intermediates vormen een vierde belangrijke kernactiviteit van DSM. In deze afdeling produceert men tussenproducten voor de aanmaak van synthetische vezels en plastics. Het bedrijf heeft wereldwijd een prominente positie als producent van caprolactam (voor de aanmaak van nylon) en acrylonitril (voor de aanmaak van onder andere acrylvezels en ABS).

De strategische groep Base Chemicals and Materials ten slotte staat, zoals de naam zegt, in voor de productie van basismaterialen en -chemicaliën. Voorbeelden hiervan zijn synthetisch rubber en thermoplastics voor verwerking in onder andere auto's, constructiemateriaal en elektronische apparaten. Ook de productie van meststoffen valt binnen deze categorie. Naast deze vijf strategische groepen bestaan er ook nog een aantal andere activiteiten die hieronder niet direct kunnen worden thuisgebracht. Voorbeelden hiervan zijn het innovatiecentrum, de licensingafdeling en het transport van aardgas uit de Noordzee (Royal DSM N.V., 2008d).

Op figuur 6.3 wordt een samenvatting gegeven van de verschillende functionele groepen binnen DSM, telkens behorend tot één van de vijf strategische pijlers, en de verschillende doelmarkten die door deze vertakkingen worden aangesproken.

In het nastreven van deze diverse activiteiten doet DSM beroep op een uitgebreid personeelsbestand van ongeveer 23 600 werknemers. Het bedrijf behaalde in 2008 een jaaromzet van 9,3 miljard euro, hetgeen zich vertaalde in een nettowinst van 577 miljoen euro. Om tot dergelijke winst- en omzetcijfers te komen heeft DSM zich geprofileerd als een belangrijke globale speler op hun betreffende markten (Royal DSM N.V., 2008d). Hiervoor maakt het gebruik van meer dan tweehonderd fabrieken en kantoren die in 49 landen wereldwijd gelegen zijn. Ook de Benelux speelt een belangrijke rol hierin, aangezien in België en Nederland enkele cruciale vestigingen terug te vinden zijn. In België kan men onderdelen van DSM terugvinden in Deinze, Genk en Tienen. In Nederland, het land van oorsprong van het bedrijf, zijn een groot aantal functionele afdelingen vertegenwoordigd in verschillende ondernemingen, waaronder de hoofdzetel. Enkele belangrijke vestigingen zijn gelegen in Geleen, Delft, Heerlen, Sittard en Zwolle (Royal DSM N.V., 2003).



Figuur 6.3: De verschillende functionele afdelingen binnen DSM en hun doelmarkten (Royal DSM N.V., 2004a, p. 1)

Innovatie is zeer belangrijk voor DSM. Dit komt ondermeer naar voren door de vooraanstaande rol ervan in het in 2005 ontwikkelde strategische programma van het bedrijf, Vision 2010 genaamd. Het doel is om in 2010 één miljard euro extra omzet uit innovatie te halen (Royal DSM N.V., 2008d). Om dit te bekomen besteedt men jaarlijks 4,2 procent van de netto-omzet aan R&D. Bovendien maakt men gebruik van een open model van innovatie. Hierbij gaat men ervan uit dat niet alle kennis binnen het bedrijf aanwezig is, maar dat winnende ideeën vaak extern te vinden zijn. Zo neemt DSM bijvoorbeeld deel in meer dan honderd partnerships en werkt het samen met diverse universiteiten (Royal DSM N.V., 2008a).

DSM heeft vier specifieke opkomende sectoren (Emerging Business Areas) gekozen waarop het zijn onderzoeksactiviteiten concentreert (Royal DSM N.V., 2008c). Deze vier segmenten sluiten sterk aan bij de sterktes van DSM en de huidige sociale en technologische trends (Royal DSM N.V., 2008a). Een eerste segment, voeding op maat, richt zich op gezondheidsverbetering door het koppelen van aangepaste voeding aan de levensstijl, leeftijd en het genetische profiel van de consument. Speciale verpakkingen sluiten ten tweede aan bij een groeiend belang van voedselkwaliteit, de toenemende interactie tussen het product en de verpakking (intelligente verpakkingen) en aanstaande veranderingen in de wetgeving. DSM besteedt dan ook extra

aandacht aan het ontwikkelen van innovatieve verpakkingen. Biomedische toepassingen worden door DSM als een derde opkomende markt bestempeld. Hierbinnen wordt bijvoorbeeld onderzoek gedaan naar materialen voor implantaten, katheters en doseerapparaten. Witte biotechnologie vormt een laatste belangrijke groeikans voor DSM. Het bedrijf ontwikkelt en onderzoekt in dit verband het gebruik van natuurlijke bouwstenen, zoals bijvoorbeeld micro-organismen en enzymen, in de productie van chemicaliën, materialen en brandstoffen (Royal DSM N.V., 2008d).

6.3.2 Witte biotechnologie

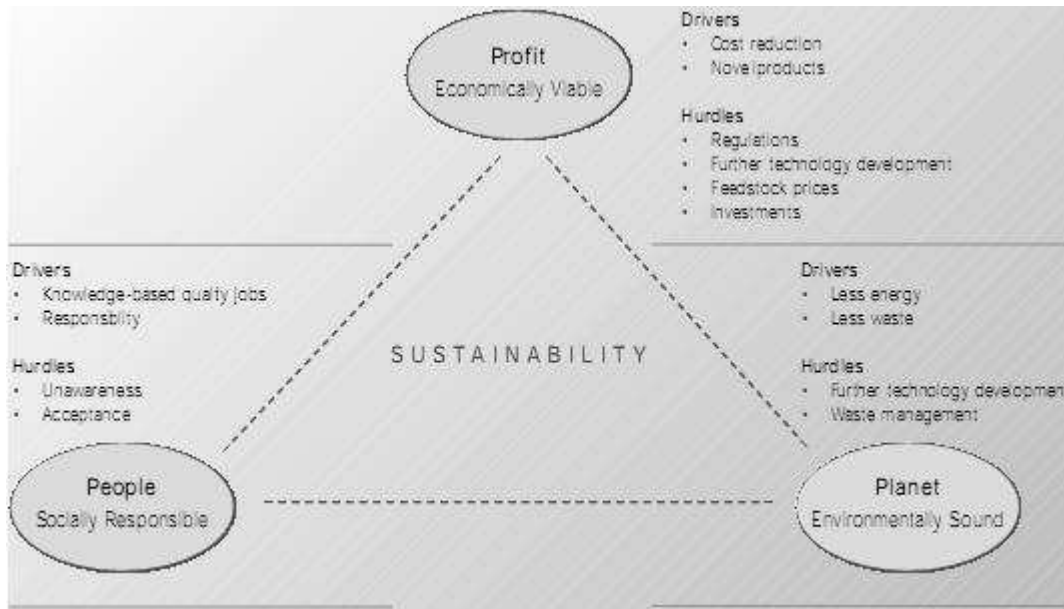
6.3.2.1 Inleiding

Het ontwikkelen van op biologische materialen gebaseerde technologieën die als alternatief voor aardolie kunnen dienen wordt door DSM als een belangrijke strategische activiteit gezien. Dit wordt duidelijk door het feit dat het bedrijf witte biotechnologie als één van de vier opkomende sectoren, waaraan extra aandacht en geld dient besteed te worden, bestempeld (R. Kirschbaum, persoonlijke communicatie, 16 maart 2009). Witte of industriële biotechnologie wordt gedefinieerd als het modern gebruik van biotechnologie voor de duurzame productie van biochemicaliën, biomaterialen en biobrandstoffen uit hernieuwbare grondstoffen door gebruik te maken van levende cellen (bijvoorbeeld schimmels en bacteriën) en/of enzymen (Royal DSM N.V., 2004b). Hiermee verschilt het van rode, blauwe en groene biotechnologie die respectievelijk binnen de farmacie, watergerelateerde toepassingen en de landbouw hun gebruik kennen (Royal DSM N.V., 2009).

DSM stelt dat de bevolking tussen 2000 en 2050 met ongeveer 3 miljard personen zal toenemen. Omdat de wereldbevolking bovendien gekenmerkt zal worden door een algemeen hoger inkomensniveau verwachten ze dat de vraag naar producten gemiddeld 3 tot 4 procent per jaar zal stijgen. In hun positiepaper (Royal DSM N.V., 2008b) ziet ook DSM de mogelijke bedreiging van piekolie voor het adequaat kunnen voorzien in deze stijgende behoefte in. Om hier het hoofd aan te kunnen bieden dienen de huidige productieprocessen efficiënter te worden maar is het ook noodzakelijk om een omschakeling te maken naar structureel verschillende (minder aardolieafhankelijke) productieprocessen en materialen. Witte biotechnologie vormt volgens DSM dan ook een deel van het antwoord op deze problematiek.

De reden voor de interesse voor witte biotechnologie als een mogelijke duurzame oplossing in deze problematiek kan gevonden worden in zijn impact op drie belangrijke elementen: People, Planet en Profit (EuropaBio, 2003). Op al deze deeldomeinen kunnen innovatieve technieken gebaseerd op hernieuwbare materialen een competitief voordeel bieden ten opzichte van traditionele aardoliegebaseerde technieken en materialen.

De economische voordelen (Profit) verbonden aan witte biotechnologie kunnen zowel worden teruggevonden in een kostenbesparing als in een opbrengststijging. In de eerste plaats brengen deze biologische technieken een lager verbruik van grondstoffen met zich mee en zijn de processen meestal eenvoudiger. Hierdoor kan men besparen op materiaal- en proceskosten. Ook zijn



Figuur 6.4: De invloed van witte biotechnologie op drie belangrijke deeldomeinen (Royal DSM N.V., 2004b, p. 6)

investeringen in fermentatie-installaties vaak lager dan deze die nodig zijn voor conventionele verwerkingsinstallaties (Royal DSM N.V., 2004b). Bovendien zal men via deze materialen en processen nieuwe producten kunnen ontwikkelen, die niet chemisch gesynthetiseerd kunnen worden, waardoor extra opbrengsten gegenereerd zullen worden (Royal DSM N.V., 2008b). Er bestaan echter enkele hindernissen in het bereiken van dit potentieel. Ten eerste is men hiervoor erg afhankelijk van de prijzen van de voedingstromen. Zo zijn de prijzen van hernieuwbare voedingsbronnen vaak nog te hoog. Dit wordt in grote mate in de hand gewerkt door het landbouwbeleid van Westerse landen en in het bijzonder de Europese Unie, waardoor productprijzen kunstmatig worden opgedreven (Royal DSM N.V., 2004b). Ook een aanhoudend lage aardolieprijs, bijvoorbeeld op het niveau van begin 2009, vormt een gevaar voor de economische rendabiliteit van witte biotechnologie (McKinsey & Company, 2009). Ten slotte vergt een verregaande omvorming van de huidige productieomgeving ook een doorgedreven investeringsprogramma, en dit zowel in R&D (bijvoorbeeld onderzoek naar fermentatietechnieken en enzymen) als in productiefaciliteiten. Hiervoor dienen uiteraard grote hoeveelheden financiële middelen aangewend te worden. Het verkrijgen hiervan wordt bemoeilijkt door het feit dat de nieuwe technologieën dienen te wedijveren met goed ontwikkelde en geoptimaliseerde chemische

technologieën die gebruik kunnen maken van schaaconomieën. Bovendien hebben deze installaties vaak hun voorziene levensduur nog niet bereikt waardoor het sluiten ervan en het investeren in alternatieven vaak nog niet aan de orde is (Royal DSM N.V., 2008b).

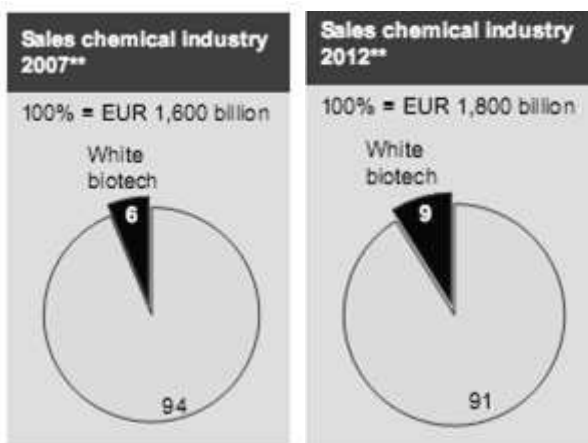
Ook op het gebied van milieu (Planet) biedt het gebruik van witte biotechnologie ter vervanging van conventionele technologieën enkele voordelen. Door gebruik te maken van alternatieve, hernieuwbare voedingsbronnen en efficiëntere processen in de productie van biologische chemicaliën, materialen en brandstoffen wordt de natuurlijke omgeving minder belast. Allereerst kan men een grote vermindering van de uitstoot aan broeikasgassen bekomen, waardoor de technologie substantieel (tot 20 %) zou kunnen bijdragen aan het bereiken van de Kyoto-doelstellingen. Verder wordt ook de afgifte van andere vervuilende stoffen aan het water en de lucht teruggebracht (Royal DSM N.V., 2004b). Bovendien verbruikt men in de verschillende processen ook minder hulpmiddelen zoals water, energie en solventen waardoor deze (al dan niet natuurlijke) hulpbronnen een langer leven beschoren zijn (EuropaBio, 2003). Ook op dit gebied levert het gebruik van witte biotechnologie echter enkele problemen op. Zo stellen tegenstanders dat een gebruik ervan op grote schaal tot gevolg zal hebben dat de biodiversiteit op aarde verminderd zal worden (Royal DSM N.V., 2008b). Ook wordt tijdens de fermentatieprocessen organisch afval geproduceerd dat men ergens moet kwijt geraken. De ontstane microbiologische massa dient eerst inactief te worden gemaakt, bijvoorbeeld door een warmtebehandeling, vooraleer het verder kan worden verwerkt tot meststof of dierenvoeding. Een goed afvalmanagement wordt dus, zeker bij een toepassing op grote schaal, noodzakelijk (Royal DSM N.V., 2004b).

Ook voor de totale samenleving (People) levert de aanwending van witte biotechnologie enkele voordelen op. Ten eerste brengt het gebruik ervan een verminderde afhankelijkheid van fossiele grondstoffen met zich mee, waardoor deze beter veilig gesteld kunnen worden voor toekomstige generaties. Verder zal het ontwikkelen van deze nieuwe industrietak ook leiden tot de creatie van nieuwe jobs. Deze technisch hoogstaande functies zullen hierbij hooggekwalificeerde werknemers tewerk kunnen stellen, hetgeen bijdraagt aan de competitiviteit van de betreffende economieën (Royal DSM N.V., 2004b). Ook op het vlak van de maatschappij, ten slotte, zijn er enkele barrières die een doorgedreven implementatie van de technologie vooralsnog bemoeilijken. Zo is de bevolking vaak onvertrouwd met de technologie. Dit vormt een drempel naar een gerichte vraag naar producten geproduceerd volgens biotechnologische methoden. Ook treedt er vooralsnog soms een probleem op met de aanvaarding van dat soort producten door de consument. Ten slotte loopt men het risico dat, vanwege de biologische aard van de gebruikte grondstoffen, er een competitie ontstaat met voedingsgewassen. De vrees bestaat dan ook dat een doorgedreven gebruik van witte biotechnologie voedselprijzen de hoogte injaagt en hiermee de voedselvoorzieningen van talloze mensen in gevaar brengt. Zogenaamde tweede generatie technologieën zouden hier wel een

oplossing voor kunnen bieden. Deze zullen naar verwachting echter pas binnen 5 tot 10 jaar commercieel rendabel zijn (Royal DSM N.V., 2008b).

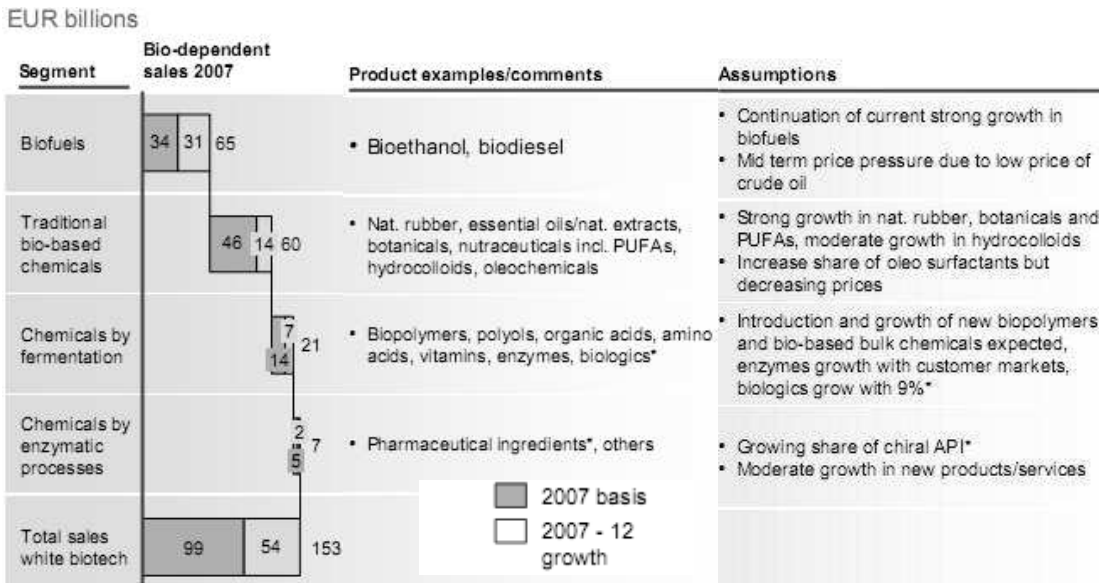
Het is duidelijk dat witte biotechnologie, mits het verhelpen van de belemmerende factoren, een belangrijke rol kan spelen in de industrie van morgen. Een onderzoek van enkele jaren geleden voorspelde dat tegen 2010, afhankelijk van de mate van adoptie, 10 tot 20 procent van alle chemicaliën via biotechnologie geproduceerd zou kunnen worden (Royal DSM N.V., 2004b). Vooral de markt van de fijne chemicaliën, waar 60 procent tegen dan op deze manier zou geproduceerd kunnen worden, blijkt interessante vooruitzichten te bieden. Het bereiken van het segment van de bulkchemicaliën zal omwille van een (voorlopig) prijsnadeel op korte termijn beperkt blijven.

Zoals uit onderstaande figuur blijkt, maakt witte biotechnologie vooralsnog het ingeschatte potentieel ervan niet waar. Zo gaan nieuwe schattingen uit van een herzien aandeel van ongeveer 9 procent in de totale hoeveelheid geproduceerde chemicaliën tegen 2012. In 2007 werd 6 procent van de chemicaliën via witte biotechnologie geproduceerd (McKinsey & Company, 2009).



Figuur 6.5: Relatief aandeel van witte biotechnologie in totale verkoop van chemicaliën (McKinsey & Company, 2009, p. 3 & 4)

Ook DSM stelt in hun positiepaper dat dit cijfer van 6 procent volgens hun inzicht ter verbetering vatbaar is (Royal DSM N.V., 2008b). Vanwege de vele voordelen verbonden aan biotechnologieën (zowel op het vlak van People, Planet als Profit) verdient dit segment extra aandacht. De adoptie van biogebaseerde transportbrandstoffen gebeurt, vanwege grote subsidiëringprogramma's en opgelegde doelen, aan een snel tempo. De overgang van traditionele naar biogebaseerde industriële processen verloopt daarentegen niet zo vlot. Deze tendensen komen uit een ander onderzoek, dat op figuur 6.6 is weergegeven, ook naar voren (McKinsey & Company, 2009). DSM stelt dan ook dat een actievere stimulatie van witte biotechnologie (en dan vooral niet-brandstof gerelateerde technieken), zowel op nationaal als grensoverschrijdend vlak, nodig is om de ecologische en economische voordelen ervan ten volle te kunnen benutten (Royal DSM N.V., 2008b).



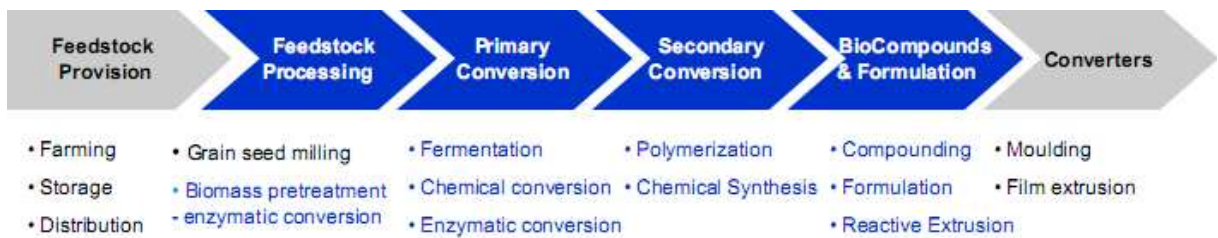
Figuur 6.6: Verkopen van producten uit witte biotechnologie per deelcategorie (McKinsey & Company, 2009, p. 3 & 4)

6.3.2.2 Witte biotechnologie binnen DSM

Witte biotechnologie wordt door DSM, zoals blijkt uit de situering ervan als één van hun vier opkomende strategische sectoren, wel een belangrijke positie toegedicht. Het bedrijf kent trouwens een lange geschiedenis in de biotechnologie, met reeds eerste ontwikkelingen in dit domein vanaf 1870 (Noorman, 2008). De toenmalig gebruikte methoden behoren tot de zogenaamde klassieke biotechnologie en behelzen onder andere de ontwikkeling van schimmels, enzymen en vitaminen. Vanaf 1980 stapte het bedrijf dan in de moderne biotechnologie waarbij bijvoorbeeld biokatalysatoren en verbeterde enzymen ontwikkeld werden. Recentelijk is DSM vervolgens in de derde golf, de witte of industriële biotechnologie, gestapt. Dit wordt gezien als een belangrijke strategische richting die het bedrijf in de toekomst zal navolgen (R. Kirschbaum, persoonlijke communicatie, 16 maart 2009).

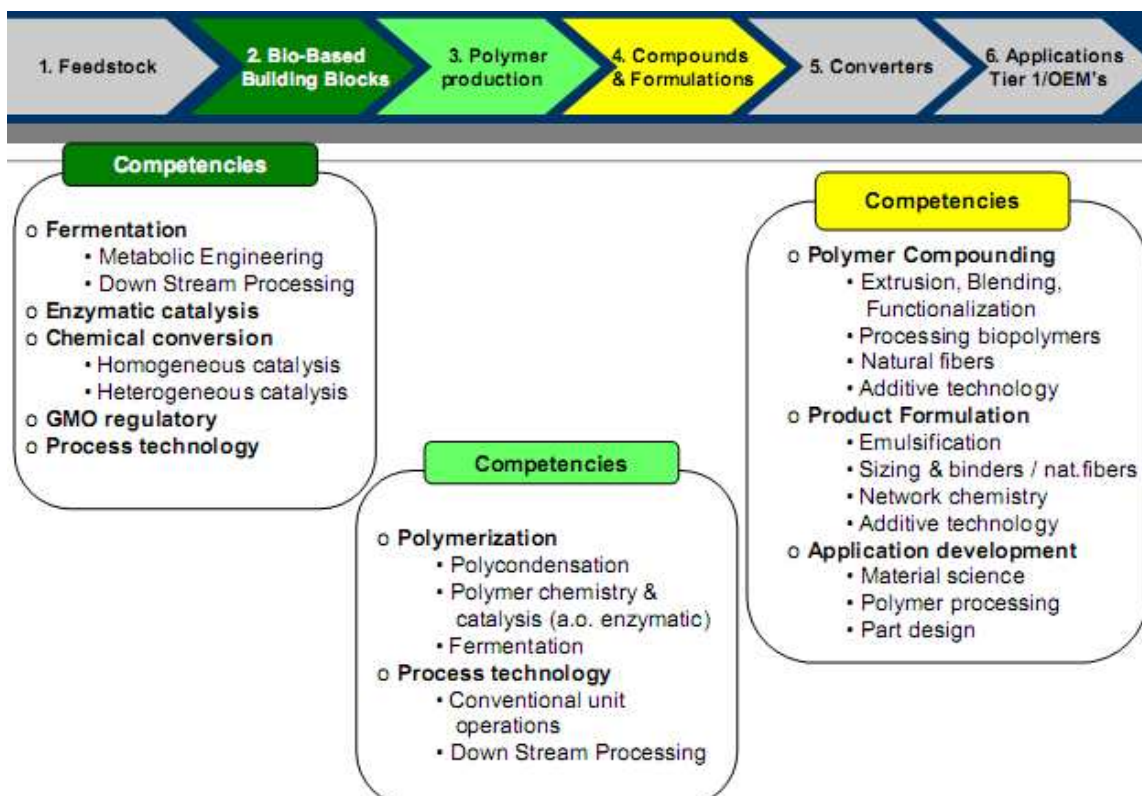
Eén van de redenen waarom DSM een dergelijke strategisch belang hecht aan witte biotechnologie is het feit dat de kerncompetenties van het bedrijf sterk aansluiten bij het ontwikkelen en het op de markt brengen van deze nieuwe technologieën waardoor het een bevoorrechte positie heeft in het bereiken van de potentiële voordelen ervan (Wubbolts, 2008). Ten eerste maakt het bedrijf reeds gedurende geruime tijd gebruik van vormen van biotechnologie, waardoor het op dit vlak ervaring heeft opgebouwd. Verder heeft het niet alleen in de Life Sciences bepaalde ervaringen opgedaan, maar vinden ook technologieën en opgedane inzichten uit de chemie en de Material Sciences aansluiting bij het ontwikkelen van op hernieuwbare grondstoffen gebaseerde materialen en processen (R. Kirschbaum, persoonlijke communicatie, 16 maart 2009). Op figuur 6.7 wordt de

waardeketen die ontstaat door het gebruik van industriële biotechnologie weergegeven. De blauwe gedeeltes van deze waardeketen sluiten sterk aan bij de ontwikkelde competenties van DSM.



Figuur 6.7: De waardeketen van industriële biotechnologie en de aansluitende competenties van DSM (Wubbolts, 2008, p. 51)

Figuur 6.8 geeft bij wijze van voorbeeld weer hoe de waardeketen specifiek voor biogebaseerde materialen is opgebouwd. Hierbij valt onmiddellijk op dat voor bepaalde cruciale ketens binnen deze waardeketen DSM kennis in huis heeft die hierbij sterk aansluit. De leemtes die er ontstaan binnen deze waardeketen, bijvoorbeeld in de aanlevering van de hernieuwbare voedingsstromen, worden volgens de filosofie van open innovatie via overeenkomsten met partners ingevuld (Claassen, 2009).



Figuur 6.8: De waardeketen voor biogebaseerde materialen en de aansluitende competenties van DSM (R. Kirschbaum, persoonlijke communicatie, 16 maart 2009)

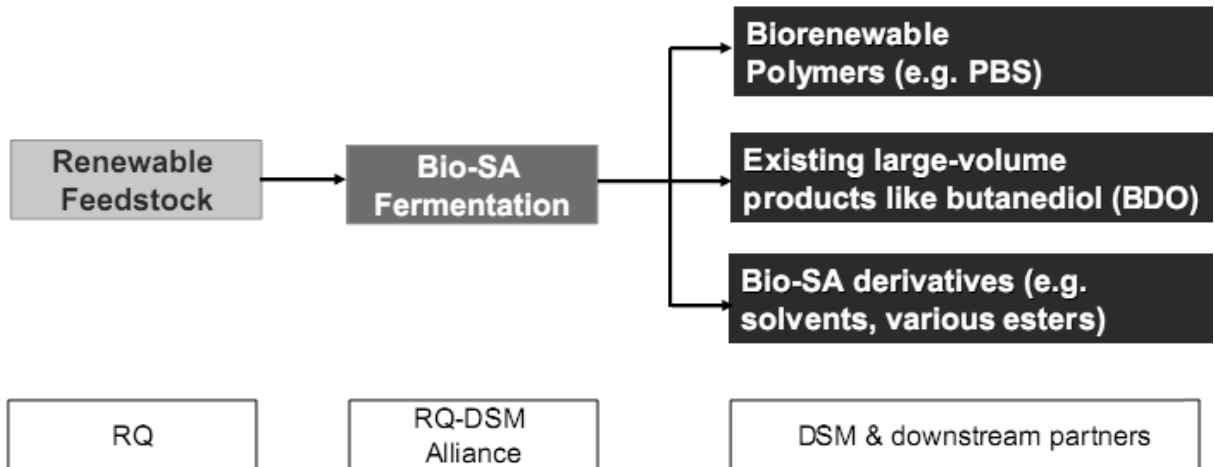
Toepassing: barnsteenzuur

Een specifiek project van Royal DSM N.V. binnen de witte biotechnologie is de samenwerking met het Franse Roquette rond biogebaseerd barnsteenzuur. Dit is een voorbeeld van de productie van een bestaand chemisch product op basis van innovatieve biologische processen. Zo produceert DSM bijvoorbeeld het product ook vanuit een fossiele voedingstroom in hun fabriek in het Oostenrijkse Linz (Tanda, 2009). De samenwerking met Roquette is ontstaan uit het BioHub-programma waar beide bedrijven, naast een tiental andere ondernemingen, in participeren. Dit programma heeft als doel de ontwikkeling van een nieuwe industrie die chemische producten produceert op basis van hernieuwbare grondstoffen te bevorderen. Nieuwe producten die in dit onderzoeksproject centraal staan zijn onder andere biopolymeren, bioplasticizers en biosolventen (Roquette, z.d.).

De samenwerking tussen DSM en Roquette in het zogenaamde Succinium Project vloeit voort uit de complementariteit van de twee bedrijven op verschillende vlakken. Allereerst is de visie en gedachtegang van de twee bedrijven zeer gelijklopend. Ze geloven beiden in een systeem van open innovatie en dus in een samenwerkingsaanpak. Bovendien heerst in beide bedrijven een sterke focus op duurzame ontwikkeling en de rol die biotechnologie daarin kan spelen. Naast deze strategische overeenkomsten, treedt er ook op het operationele vlak een uitstekende match tussen beide bedrijven op. Er bestaat namelijk een sterke complementariteit tussen de competenties en kennis van de twee ondernemingen (Sijbesma, 2009).

Beide ondernemingen bezitten namelijk unieke sterktes in verschillende delen van de waardeketen van biochemicalïën en -producten. Terwijl de sterktes van DSM zich meer in het stroomafwaartse gedeelte bevinden (fermentatie, polymerisatie, formulering,...), situeren die van Roquette zich vooral in het begin. Het bedrijf is namelijk één van de grootste producenten van hernieuwbare grondstoffen (maïs, tarwe, aardappelen en erwten). Hieruit ontwikkelt het dan ook afgeleide producten die in verschillende domeinen zoals de chemische, farmaceutische voedingsindustrie worden gebruikt. Zo is het bedrijf bijvoorbeeld op het vlak van polyolen (suikeralcoholen waaronder sorbitol) wereldleider (Roquette, 2009).

Uit figuur 6.9 blijkt duidelijk welke rol beide bedrijven spelen in het creëren van waarde voor de consument. Het is in de tweede stap van dit proces dat de competenties van DSM en Roquette elkaar ontmoeten.

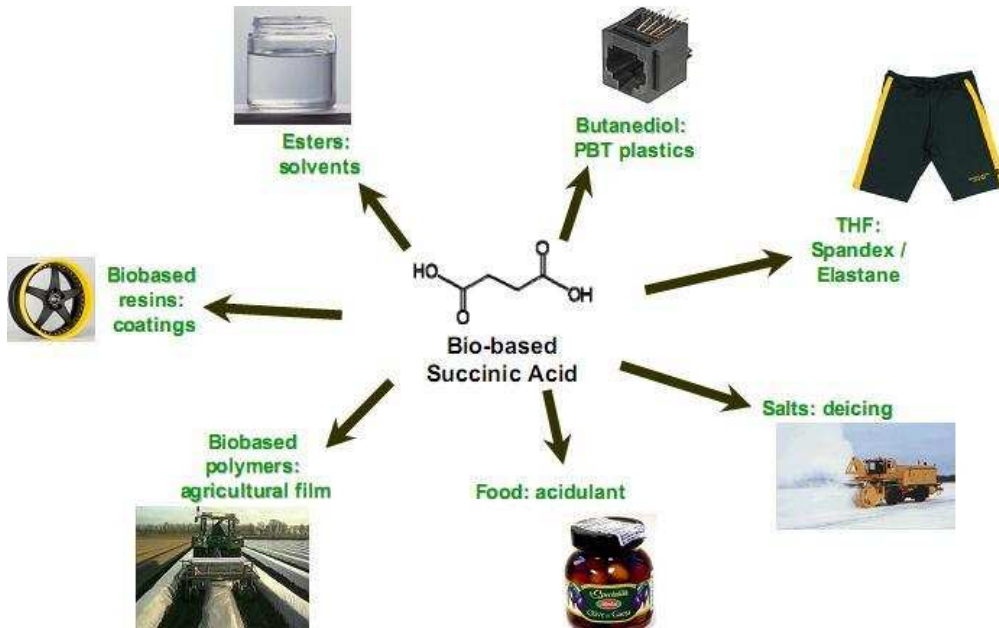


Figuur 6.9: Positie van de samenwerking tussen DSM en Roquette in de waardeketen (Wubbolts, 2008, p. 47)

Barnsteenzuur wordt momenteel via petrochemische processen (katalytische hydrogenatie van maleïnezuur en maleïnezuuranhydride) geproduceerd uit de fossiele grondstoffen aardolie en aardgas (Dong, Fang, Ni, Sun, & Zheng, 2009). Jaarlijks wordt er wereldwijd ongeveer dertigduizend ton van het product op die manier geproduceerd (Rupp-Dahlem & van den Tweel, 2008). Het is echter ook mogelijk deze chemische stof via technieken uit het domein van de industriële biotechnologie te produceren. Meerbepaald maakt men in het samenwerkingsverband gebruik van gerichte fermentatie van de biologische voedingsstroom om het verkozen product te bekomen (Sijbesma, 2009).

Het gevormde barnsteenzuur kan vervolgens in een grote verscheidenheid aan toepassingen worden ingezet. Hierdoor behoort het tot de mogelijke biogebaseerde platformchemicaliën (Dong et al., 2009). Zo kan het gebruikt worden in de aanmaak van industriële chemicaliën zoals butaandiol. Verder is het ook mogelijk om er bijvoorbeeld solventen, zouten en harsen uit te fabriceren. Ten slotte kan het product ook verwerkt worden in tal van polymeren. Een belangrijke toepassing binnen deze laatste categorie is biologisch afbreekbaar polyester (PBS) dat bijvoorbeeld in plastic films verwerkt kan worden. Deze kunnen dan onder andere dienen als afdekkingsmateriaal in de landbouw. Ook polyesters (PIS) voor gebruik in poedercoatings behoren tot de mogelijke toepassingen (Sijbesma, 2009). Op figuur 6.10 wordt een greep uit de belangrijkste toepassingen van barnsteenzuur weergegeven.

Op dit moment kent het grootste deel van het barnsteenzuur en zijn afgeleiden (ongeveer 31 procent) een toepassing in coatings, pigmenten en verven. Ook de farmaceutische (12 %) en de voedingsindustrie (9%) zijn belangrijke afnemers van het product. Daarnaast wordt tegenwoordig ongeveer 7 procent in polymeren verwerkt (Rupp-Dahlem & van den Tweel, 2008).



Figuur 6.10: Mogelijke producten op basis van biogebaseerd barnsteenzuur (Sijbesma, 2009, p. 20)

De productie van barnsteenzuur op basis van biogebaseerde voedingsstromen levert een aantal belangrijke voordelen op ten opzichte van de conventionele aanmaak op basis van aardolie. Zo levert de biotechnologische route een energiebesparing op die op dit moment ongeveer 40 procent bedraagt. In de toekomst, na optimalisatie van de technieken, zou dit zelfs kunnen oplopen tot 70 procent (Rupp-Dahlem & van den Tweel, 2008). Omdat bovendien tijdens het proces ook nog eens CO_2 verbruikt wordt treedt er ook een grote vermindering van de uitstoot van dit broeikasgas op. Op dit gebied kan er een vooruitgang van 50 tot 80 procent in vergelijking met conventionele methodes optreden (Wubbolts, 2008). Verder wordt door gebruik te maken van biomassa de afhankelijkheid van aardolie weggenomen. Met het oog op een piek in de aardolieproductie en de bijhorende stijging van de aardolieprijzen zal het belang van dit voordeel op termijn enkel maar toenemen. Ten slotte zal het ook mogelijk zijn om nieuwe biogebaseerde en bioafbreekbare toepassingen zoals plastics, vezels en harsen te produceren (Sijbesma, 2009).

Hoofdstuk 7: Conclusies en aanbevelingen

In dit concluderende hoofdstuk zal een verduidelijkende samenvatting worden gegeven van een aantal prominente conclusies die uit het onderzoek in het kader van deze masterproef kunnen getrokken worden. Hiervoor zullen de belangrijkste elementen uit elk hoofdstuk op een kritische wijze nader toegelicht worden. Het hoofdstuk, en daarmee ook de masterproef, zal worden afgesloten met een aantal aanbevelingen die vanuit deze conclusies naar de overheid to kunnen geformuleerd worden.

7.1 Conclusies

Het gebruik van aardolie is in het dagelijkse leven haast niet meer weg te denken. Vele dingen die iedereen als vanzelfsprekend beschouwd zouden gewoonweg niet mogelijk zijn zonder de fossiele grondstof. Zo is voor aardolie bijvoorbeeld een uitermate belangrijke rol weggelegd in de transportsector (International Energy Agency, 2008b). Zonder aardolie zou de huidige technologische stand van zaken in het personen- en goederenvervoer, en de bijhorende wereldwijde positieve economische en maatschappelijke gevolgen daarvan, moeilijk te bereiken zijn geweest. Ook de vele petrochemische applicaties die uit het product kunnen vervaardigd worden hebben een onmiskenbare invloed gehad in de ontwikkeling van de Westerse leefwereld. Het product aardolie is dan ook onlosmakelijk verbonden aan de levensstandaard van een groot deel van de wereldbevolking.

Deze afhankelijkheid ten opzichte van de grondstof brengt vanzelfsprekend gevaren met zich mee. Zo is men ten eerste afhankelijk van een aardolieaanvoer die vaak uit onstabiele regio's afkomstig is. Dit bleek al een probleem tijdens beide oliecrisisen in de jaren '70 (Parra, 2004). Daarnaast komen bij de verbranding van fossiele brandstoffen vervuilende stoffen vrij. Vooral de rol van CO₂, één van deze schadelijke stoffen, in de opwarming van de aarde is de laatste jaren sterk op de voorgrond getreden. Het is dan ook vooral dit probleem dat de grootste publieke aandacht geniet. In relatieve stilte speelt zich echter op de achtergrond ook een heel andere problematiek af die de nodige aandacht verdient. De overvloedige beschikbaarheid van de broodnodige brandstof en grondstof is namelijk niet zo vanzelfsprekend als ze mag lijken.

Conclusie I: De aardolievoorraad is niet onuitputtelijk en problemen op het vlak van de bevoorrading kunnen reeds binnen afzienbare tijd optreden.

In wetenschappelijke kringen wordt algemeen aangenomen dat aardolie door middel van een organisch proces gevormd wordt. Een miljoenen jaren durend omzettingsproces van afgestorven planten- en dierenresten zal, onder de juiste omstandigheden, aanleiding geven tot het vormen van de vloeistof (Thompson & Turk, 2004). Vanwege de karakteristieken van dit vormingsproces is aardolie een uitputbare grondstof. De aanwezige voorraden vormen, naast uiterst marginale toekomstige toevoegingen, een eindige hoeveelheid exploiteerbare aardolie. Recente cijfers tonen aan dat de resterende reserves tegen het huidige verbruiksniveau nog voor ongeveer 40 jaar de wereld van aardolie kunnen voorzien (BP, 2008). De verwachte vraagstijging in de komende decennia, die vooral wordt aangedreven door een sterke groei in ontwikkelende gebieden, zal deze periode vanzelfsprekend nog inkorten. Er speelt echter nog een groter probleem op dit gebied. Vooraleer deze voorraden de uitputting benaderen, zal de productie van aardolie namelijk op een bepaald moment pieken. Dit fenomeen, dat reeds in 1956 door de geofysicus Hubbert werd beschreven, heeft tot gevolg dat de aardolieproductie op een bepaald moment een maximum bereikt en vanaf dan enkel maar zal afnemen. Rond het moment van dit optreden van de piek heerst enige onenigheid, al verwacht de meerderheid van de analisten dat dit zeker voor 2030 het geval zal zijn (National Energy Technology Laboratory, 2007). De wereld zal dus ruim voor de vaak aangehaalde periode van veertig jaar reeds te maken krijgen met bevoorradingsproblemen van aardolie. Vanaf dat de piek bereikt is zal de situatie bovendien van kwaad naar erger gaan omdat de daling zich steeds uitgesprokener zal manifesteren.

Conclusie II: De vraag naar energie in het algemeen en aardolie in het bijzonder zal wereldwijd een sterke groei kennen in de komende decennia.

Recente data tonen aan dat de wereldwijde vraag naar energie tussen nu en 2030 met meer dan 40 procent zal stijgen. Dit komt overeen met een gemiddelde jaarlijkse groei van 1,6 procent in die periode (International Energy Agency, 2008d). Dit is vooral te wijten aan een explosieve vraaggroei in ontwikkelingslanden, waarbij vooral China en India het voortouw nemen. Voorspellingen van analisten geven bovendien aan dat deze vraagstijging overwegend zal worden opgevangen door een toenemend gebruik van fossiele brandstoffen. Steenkool zal naar verwachting, vooral vanwege sterke toenames van het verbruik in China en India, de grootste afnamestijging kennen. Ook aardgas zal in de beschouwde periode een gestage opmars maken. Toch zal het grootste deel van de vraag naar energie in 2030 nog altijd via aardolie bevredigd moeten worden. Ook de vraag naar aardolie zal dus gekenmerkt worden door een substantiële vraagstijging (International Energy Agency, 2008b). Dit plaatst vanzelfsprekend extra druk op de bevoorradings situatie van het kostbare product. Een sterke vraagstijging naar aardolie zal namelijk, met het naderende pieken van de productie ervan, sneller leiden tot onevenwichtigheden tussen vraag en aanbod. Dit maakt de hele problematiek enkel maar precairder.

Conclusie III: De bevoorradingsproblemen op het gebied van aardolie zal de wereld ook op economisch gebied voor uitdagingen plaatsen.

Een te verwachten onevenwicht tussen vraag en aanbod, veroorzaakt door een stijgende wereldwijde vraag naar aardolie in combinatie met een piekende aardolieproductie, zal onvermijdelijk enkele economische gevolgen met zich meedragen. Economische basistheorie stelt namelijk dat een dergelijke situatie vanzelf zal leiden tot een hogere prijs voor de grondstof. Voorts blijkt ook dat de prijsvolatiliteit, vanwege de onzekerheid rond een voldoende bevoorrading, zal toenemen (Hirsch et al., 2005). Vanwege de belangrijkheid van aardolie in het dagdagelijks leven zullen deze twee effecten dan ook doorsijpelen in enkele cruciale macro-economische indicatoren zoals de inflatie, de werkloosheid en het bruto binnenlands product. De positieve effecten van een prijsstijging die ervaren worden door olieproducerende landen worden in ruime mate overstege door de negatieve gevolgen voor de rest van de wereld. Vooral ontwikkelingslanden, waar het belang van aardolie in de nationale productie het grootst is, worden hierdoor hard getroffen. Ook enkele huidige motoren van de wereldwijde economie, zoals China en India, blijven hier niet van gespaard (International Energy Agency, 2004a).

Een verhoogde prijsvolatiliteit zorgt bovendien voor een verergering van deze problematiek aangezien, vanwege een waargenomen asymmetrische relatie, prijsstijgingen een veel grotere schade toebrengen dan dalingen teniet doen. Het netto-effect van een dergelijke beweging is dus negatief en door een gestegen volatiliteit van de prijs zal dit proces steeds vaker herhaald worden en zal de gecumuleerde schade dus ook steeds groter worden (Hirsch et al., 2005). Ondanks dat de impact van een hogere aardolieprijs op de economie de laatste decennia is afgenomen (o.a. vanwege een beter economisch beleid, een kleiner belang van aardolie in het BBP en de afwezigheid van andere negatieve schokken), dient men dus toch rekening te houden met mogelijk verregaande economische gevolgen in de toekomst. Voor België stelt deze problematiek zich zelfs nog meer uitgesproken aangezien het land één van de meest aardolie-intensieve ter wereld is (BP, 2008).

Conclusie IV: Aardolie is een natuurlijke grondstof waaruit een brede waaier aan producten kan geproduceerd worden. Deze producten kennen op hun beurt een gebruik in ontelbare toepassingen. Transportdoeleinden staan hierbij met stip op nummer één genoteerd.

Het uitgevoerde onderzoek heeft meer dan een dozijn mogelijke producten die uit aardolie kunnen worden afgeleid voortgebracht. Hiertoe behoren enkele voor het grote publiek zeer bekende

eindproducten zoals benzine, diesel, huisbrandolie en LPG. Aardolie is echter ook het startpunt voor een aantal minder voor de hand liggende producten zoals nafta, petroleumwassen, cokes en asfalt. Ten slotte behoort ook een speciale groep afgeleide producten, de petrochemicaliën, tot de uitgebreide mogelijkheden van het product aardolie (Speight, 2006).

Deze alomtegenwoordigheid van het product komt vooral tot uiting op het gebied van transport. Maar liefst 60 procent van de totale geproduceerde hoeveelheid aardolie wordt hiervoor gebruikt (International Energy Agency, 2008b). De hoge energie-inhoud van de verschillende producten (benzine, diesel, LPG) en een vergevorderde ontwikkeling van de infrastructuur (brandstofverdelingspunten, specifieke motoren,...) maken aardolie op dit gebied dan ook uitermate interessant. Omdat het belang van dit gebruik in de totale aardolieconsumptie naar verwachting in de toekomst zal blijven toenemen en transport een belangrijke rol heeft in de wereldwijde welvaart en economische ontwikkeling, vormen toekomstige bevoorradingproblemen van aardolie dan ook een ernstig probleem.

Ook het gebruik in niet-energiegerelateerde toepassingen kent de laatste decennia een opmars en vertegenwoordigt momenteel ongeveer één zesde van alle consumptie (International Energy Agency, 2008a). Tot deze categorie behoren producten zoals smeeroliën en -vetten, asfalt en cokes. Ook petrochemicaliën vormen een belangrijke vertegenwoordiger van deze categorie. Men schat dat ongeveer vier procent van de aardolie als voedingsbron voor de petrochemische sector gebruikt wordt (Molnár & Olah, 2003). Vanwege de energie-intensiteit van de gebruikte processen loopt het totale aardolieverbruik van petrochemische installaties nog hoger op. Deze sector is dus ook blootgesteld aan aanzienlijke risico's op het vlak van bevoorradingproblemen rond aardolie en de daarmee gepaard gaande prijsstijgingen.

Voor toepassingen in andere gebieden kan men opmerken dat het relatief belang ervan in de aardolieconsumptie vaak afneemt. Deze tendens is zowel op te merken in de industrie als in andere sectoren. Tot deze laatste categorie behoort het verbruik van de landbouw, gezinnen en commerciële- en overheidsdiensten (International Energy Agency, 2008a).

Conclusie V: Het pieken van de aardolieproductie zal wellicht geen energiecrisis veroorzaken. Zonder adequate maatregelen stevent de wereld wel af op een globale crisis op het vlak van vloeibare transportbrandstoffen.

De afname van het relatief belang van de consumptie uit industriële en andere sectoren in het totale aardolieverbruik dient niet als verrassing te komen. Het is namelijk in deze sectoren dat er een aantal haalbare en rendabele alternatieven bestaan. Zo blijkt bijvoorbeeld een groot aantal van

de onderzochte alternatieven een toepassing te hebben in de aanmaak van elektriciteit. Deze alternatieven zouden dan ook vrij eenvoudig het huidige aardolieverbruik in deze sector, namelijk ongeveer 6 procent van de totale consumptie, kunnen vervangen (International Energy Agency, 2008a). Ook op het vlak van andere stationaire toepassingen zoals het verwarmen van ruimtes en water bestaan er een aantal interessante alternatieven. Aardolie wordt in deze toepassingsgebieden dan ook steeds vaker gesubstitueerd door aardgas en andere alternatieven (International Energy Agency, 2008b). Dit komt bijvoorbeeld tot uiting in een sterke daling van de geconsumeerde hoeveelheid huisbrandolie sinds het uitbreken van de oliecrisis in de jaren '70 (Parra, 2004). Voor deze stationaire toepassingen stelt het pieken van de aardolieproductie dan ook geen onoverkomelijke problemen aangezien valabele alternatieven bestaan en andere (hernieuwbare) technologieën steeds concurrentiëler worden.

Het grootste verbruik van aardolie komt echter niet voort uit stationaire toepassingen, maar bevindt zich in het transport. Het is dan ook op dit vlak dat mogelijke alternatieven een overweldigende impact kunnen hebben. Vooralsnog kan men uit deze hoek echter weinig positieve geluiden ontwaren. Omdat aardolie als vloeibare en compacte energiedrager uiterst geschikt is voor gebruik in het vervoer van personen en goederen en er bovendien een efficiënte infrastructuur hiervoor is opgebouwd, is het vinden van concurrentiële alternatieven op dit gebied niet eenvoudig. Daarom zal men in de eerste plaats substituten ontwikkelen die compatibel zijn met de huidige voertuigen en installaties (Gielen & Unander, 2005). Zo worden biobrandstoffen en onconventionele aardolie (vooral oliezanden en extra zware aardolie) nu reeds op commerciële schaal geproduceerd en zal het belang hiervan in de toekomst naar verwachting gestaag toenemen. Ook de productie van synthetische aardolie via CTL en GTL-processen zal hierin een, weliswaar vrij beperkte, rol spelen. Ondanks een naar verwachting vrij explosieve groei in de productie van deze alternatieve transportvloeistoffen (tot een aandeel van 9 procent van het totale aardolieverbruik in 2030) dient men hier geen heiligmakende oplossing van te verwachten (Energy Information Administration, 2008). Deze alternatieven zouden namelijk vooral moeten aanzien worden als tijdelijke buffer tegen het pieken van de aardolieproductie in de ontwikkeling van een werkelijk revolutionair vernieuwende transporttechnologie (Ball & Wietschel, 2009). De ontwikkeling van deze technieken, met waterstof als belangrijkste exponent, staat nog in zijn kinderschoenen en heeft dus nog een lange weg af te leggen vooraleer valabele substituten op grote schaal geïntroduceerd kunnen worden. Zonder gepaste maatregelen zullen er dus vooral op het gebied van transport problemen optreden die een mogelijke bedreiging zullen vormen voor het wereldwijde welvaartsniveau.

Conclusie VI: Het zijn vooral de grote olie- en gasmaatschappijen die investeren in alternatieven voor aardolie. Hun geïnvesteerde middelen gaan hoofdzakelijk uit naar technieken die compatibel zijn met hun kernactiviteiten en de huidige infrastructuur.

Uit voorgaande discussie blijkt duidelijk dat een tijdige implementatie van de nodige alternatieven vereist is om de negatieve gevolgen verbonden aan piekolie op te vangen. Uit onderzoek blijkt dat sinds de eeuwwisseling verreweg het meeste werd geïnvesteerd in vernieuwende koolwaterstoffen (oliezanden, olieschalie, extra zware aardolie, CTL, GTL,...). Ook op het vlak van het soort investeerder blijkt er een groot overwicht voor één partij. De olie- en gasmaatschappijen zijn namelijk verantwoordelijk voor ongeveer twee derde van alle investeringen in alternatieve technologieën (Foss et al., 2008). Beide bevindingen zijn niet los van elkaar te zien. Het overgrote deel van de investeringen van oliemaatschappijen gaat namelijk uit naar aan conventionele technologieën verwante technieken. Dit is logisch aangezien de productie van koolwaterstoffen en de omvorming ervan tot hoogwaardige producten tot hun kerncompetenties behoort. Deze nieuwe technieken (GTL, olieschalie, olie-zanden,...) kunnen dan ook gezien worden als uitbreidingen op hun expertise. Ondanks het beeld dat deze maatschappijen graag naar buiten willen brengen, blijken strategische stappen richting een werkelijke energierevolutie vooralsnog dus nog niet aan de orde voor hen.

Indien men kijkt naar andere private bedrijven valt op dat zij vernieuwende koolwaterstoffen net links laten liggen. De investeringen in vernieuwingen in het eindgebruik van energie (cogeneratietechnieken, brandstofcellen en geavanceerde voertuigtechnieken) en in niet-koolwaterstoffen (kernenergie, biomassa, wind en zonne-energie,...) bedragen beiden ongeveer de helft van de uitgaven van andere private bedrijven (Foss et al., 2008). Op het vlak van het eindgebruik blijken vooral autofabrikanten de belangrijkste geldschieters, met belangrijke investeringen in geavanceerde voertuigtechnologieën zoals hybride wagens. Niet-koolwaterstoffen worden gekenmerkt door belangrijke investeringen vanwege landbouwbedrijven (biomassa), elektriciteitsproducenten en productieondernemingen (zonne- en windenergie).

De overheidsbestedingen zijn meer gediversifieerd, met investeringen in elk van de besproken technologieën. De grootste aandacht gaat naar vernieuwende koolwaterstoffen (44 %), gevolgd door niet-koolwaterstoffen (36 %) en vernieuwingen op het vlak van eindgebruik (20 %). Foss et al. (2008) merken op dat ondanks het feit dat de grootte van deze investeringen vrij beperkt is, de overheid toch een belangrijke invloed kan hebben door als aantrekkingskracht voor private investeringen te dienen.

Zoals reeds tijdens en na beide oliecrisisen duidelijk werd, hangt de mate van investeringen in alternatieven voor aardolie sterk af van de heersende olieprijs (Parra, 2004). Vele alternatieven zijn namelijk pas competitief bij een aanhoudende periode van relatief hoge aardolieprijzen. De scherpe daling van de internationale noteringen sinds juli 2008, in combinatie met een wereldwijde economische crisis, vormt dus een reëel gevaar voor de ontwikkeling van alternatieven (Solnik, 2008).

Conclusie VII: Materialen, chemicaliën en brandstoffen op basis van witte biotechnologie bieden een interessant alternatief ter vervanging van hun conventionele varianten.

Witte of industriële biotechnologie wordt gedefinieerd als het modern gebruik van biotechnologie voor de duurzame productie van biochemicalïën, biomaterialen en biobrandstoffen uit hernieuwbare grondstoffen door gebruik te maken van levende cellen (bijvoorbeeld schimmels en bacteriën) en/of enzymen (Royal DSM N.V., 2004b). Gebruik van dergelijke technologie maakt het mogelijk om op aardolie gebaseerde varianten op een duurzame manier te vervangen. Bovendien brengen deze vernieuwende processen enkele interessante voordelen met zich mee.

Deze voordelen manifesteren zich op drie belangrijke peilers: Profit, People en Planet (EuropaBio, 2003). De economische voordelen verbonden aan witte biotechnologie kunnen zowel worden teruggevonden in een kostenbesparing als in een opbrengststijging. Zo brengen deze biologische technieken een lager verbruik van grondstoffen met zich mee en zijn de processen meestal eenvoudiger. Hierdoor kan men besparen op materiaal- en proceskosten. Daarnaast zal men via deze materialen en processen nieuwe producten kunnen ontwikkelen, die niet chemisch gesynthetiseerd kunnen worden, waardoor extra opbrengsten gegenereerd zullen worden. Vervolgens heeft witte biotechnologie ook op het vlak van milieu enkele onmiskenbare voordelen. Door gebruik te maken van hernieuwbare voedingsbronnen en efficiëntere processen kan men de belasting voor de natuurlijke omgeving verbonden aan de productie van materialen en chemicaliën verminderen. Zo worden de processen gekenmerkt door een verlaagde uitstoot van broeikasgassen en andere vervuilende stoffen. Ook het verbruik van water, energie en solventen wordt teruggeschroefd. Ten slotte levert het gebruik van witte biotechnologie ook voor de samenleving enkele voordelen op. Ten eerste brengt het gebruik ervan een verminderde afhankelijkheid van fossiele grondstoffen met zich mee, waardoor deze beter veilig gesteld kunnen worden voor toekomstige generaties. Verder zal het ontwikkelen van deze nieuwe industrietak ook leiden tot de creatie van nieuwe, hooggekwalificeerde jobs (Royal DSM N.V., 2004b).

Het gebruik van witte biotechnologie heeft op dit moment nog met enkele problemen te kampen (zoals een vrij hoge prijs van de voedingsstroom in combinatie met een gedaalde aardolieprijs, een noodzaak aan aanzienlijke R&D-inspanningen en investeringen en gevaren voor de biodiversiteit en de voedselvoorziening,...) maar biedt desalniettemin een groot potentieel. De technologie stelt bedrijven namelijk in staat een aanzienlijk gedeelte van de wereldwijde geproduceerde chemicaliën op een duurzame en milieuvriendelijke wijze te produceren (Royal DSM N.V., 2004b). Dit zal de afhankelijkheid van de sector ten opzichte van aardolie substantieel kunnen terugbrengen. Sommige chemische bedrijven, zoals bijvoorbeeld Royal DSM N.V., zien dit in en beschouwen witte biotechnologie als één van hun strategische groeipilaren.

7.2 Aanbevelingen

Vanuit voorgaande conclusies en de rest van het onderzoek kunnen vervolgens een aantal aanbevelingen voor overheden worden geformuleerd. Deze aanbevelingen kunnen een (gedeeltelijk) antwoord bieden op de beschreven problematiek.

Aanbeveling I: De Belgische regering kan best stappen ondernemen om de energievoorziening van het land de komende decennia veilig te stellen.

België is, zoals uit recente cijfers blijkt, één van de meest energie-intensieve landen ter wereld (BP, 2008). Ook voor aardolie in het bijzonder behoort het land op het vlak van consumptie per capita tot de globale top. Hierdoor is België en zijn bevolking bijzonder kwetsbaar voor de gevolgen van het uitputbare karakter van aardolie. Daarenboven beschikt het land niet over inheemse voorraden van aardolie waardoor het extra blootgesteld is aan de risico's verbonden aan bevoorradingsmoeilijkheden (FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie, 2006).

De uitstap van de regering uit kernenergie zorgt er bovendien voor dat België tegen 2030 voor het overgrote deel van zijn energiebehoefte afhankelijk zal zijn van fossiele brandstoffen. Voor deze fossiele brandstoffen is het land quasi volledig aangewezen op het buitenland. Tegen het einde van de projectieperiode zou namelijk slechts vijf procent van de energievraag bevredigd worden door middel van binnenlandse productie (FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie, 2006). Dit resterende aandeel wordt ingevuld door hernieuwbare energiebronnen, waarbij vooral biomassa en windenergie een belangrijke rol kennen.

Bovenstaande bevindingen en ontwikkelingen hebben dus tot gevolg dat België zich op het vlak van energievoorziening in een zeer kwetsbare positie bevindt. Het land is quasi volledig afhankelijk van energiebronnen die gekenmerkt worden door een gelimiteerde resterende voorraad en een te verwachten piek in de productie in de nabije toekomst. Voor aardolie, waarop energieverbruikers in het land nog altijd het meest beroep doen, dringt deze problematiek zich het eerst en het sterkst op. Het is dan ook geen overbodige luxe om maatregelen te nemen die deze precaire situatie minder bedreigend maken.

Om de risico's zoveel mogelijk te verkleinen is het wijselijk dat de regering pogingen onderneemt om het energiepalet zoveel mogelijk te diversifiëren. Op die manier wordt een overdreven afhankelijkheid van één energiebron vermeden waardoor problemen beter kunnen worden opgevangen. In dit opzicht verdient de ontwikkeling van diverse (hernieuwbare) alternatieven voor

een overwegend fossiele energieaanvoer de nodige aandacht. Ook kan het aan te raden zijn om, met het oog op de te verwachten problemen verbonden aan piekolie, de uitstap uit kernenergie opnieuw te overwegen. De voordelen die deze technologie biedt zoals een kostenefficiënte elektriciteitsproductie, een verlaagde broeikasgassenuitstoot en een relatief verzekerde bevoorrading spelen in de huidige en toekomstige (economische) context een vooraanstaande rol.

Naast een diversificatie van de energiebronnen dient er binnen elk van deze bronnen ook een gediversifieerd leveranciersbestand te worden betracht. Op die manier zal België beter beschermt worden tegen de grillen van beleidsmakers in sommige onstabiele olieproducerende landen. De tendens die hierbij op het vlak van aardolie is ingezet is lovenswaardig en dient ook verder nagestreefd te worden. Zo werd de afhankelijkheid van aardolie uit de OPEC-landen ten opzichte van de situatie in de jaren '70 drastisch afgebouwd (Belgische Petroleum Federatie, 2007a). Men dient er echter beducht op te zijn om de aanvoer vanuit Rusland niet te dominant te laten worden. Ook dit land heeft namelijk recentelijk laten zien energie als een strategisch instrument te willen gebruiken indien nodig.

Aanbeveling II: De ontwikkeling van valabele alternatieven voor aardolie op korte tot middellange termijn is noodzakelijk en kan niet enkel aan de vrije markt worden overgelaten. Dit is zeker het geval in tijden waarin de olieprijs op een (te) laag niveau staat.

Op een gegeven moment in de nabije toekomst zal de aardolieproductie, vanwege het niet-hernieuwbare karakter van de grondstof, pieken en vanaf dan enkel maar afnemen (Hubbert, 1956). In combinatie met een te verwachten verhoogde wereldwijde vraag naar energie in het algemeen en naar aardolie in het bijzonder levert deze situatie problemen op. Om het huidige welvaartsniveau te behouden en zelfs verder te ontwikkelen is het dan ook noodzakelijk dat adequate maatregelen worden genomen om deze daling in de productie op te vangen. In hun befaamde studie stellen Hirsch et al. (2005) dat, om een toekomstig tekort aan vloeibare transportvloeistoffen te vermijden, een concrete en doorgedreven aanpak reeds twintig jaar voor het optreden van de piek dient te worden ingezet. De boodschap voor de regering is dan ook duidelijk. Tijdige actie met als doel de gevolgen van piekolie aan te pakken en te matigen is mogelijk en het minst kostelijk. Maatregelen die te laat of onvoldoende verregaand zijn plaatsen de maatschappij voor een groot probleem. Aangezien het bekende Stern-rapport bovendien oproept tot vroegtijdige en adequate actie om de negatieve economische gevolgen verbonden aan de opwarming van de aarde te beperken, bestaat er de mogelijkheid om een breed (politiek) draagvlak te creëren om beide hete hangijzers op het vlak van fossiele brandstoffen aan te pakken (Stern, 2006). Preventieve acties zijn dus noodzakelijk en kunnen best zo snel mogelijk op

voldoende grote schaal geïnitieerd worden. Hierbij dient men zowel kansen op het vlak van het gebruik van aardolie als brandstof en als grondstof te onderzoeken en na te streven.

Uit de conclusies van Kaufmann & Shiers (2008) valt bovendien op te merken dat deze noodzakelijke ontwikkeling van alternatieven niet volledig aan de markt kan worden overgelaten. Zij concluderen met name dat de onzekerheid met betrekking tot het exacte moment waarop de globale aardolieproductie zijn maximum bereikt er toe leidt dat er een asymmetrie optreedt in het investeringsprogramma dat het meeste nut oplevert voor de maatschappij, respectievelijk de bedrijven. Ook Hirsch et al. (2005) stellen dat er in dit verband twee mogelijke opties bestaan. Indien alternatieven te vroeg ontwikkeld worden heeft dit een inefficiënte aanwending van beschikbare middelen en het maken van onnodige kosten tot gevolg. Indien ontwikkelde nieuwe technologieën echter te laat beschikbaar zijn brengt dit grote gevolgen voor de maatschappij als geheel met zich mee. De auteurs halen dan ook aan dat een minimalisatie van het risico verbonden aan beide opties automatisch leidt tot een vroege ontwikkeling van alternatieven. Omdat bedrijven ten gevolge van de onzekerheid rond het tijdstip van het pieken van de productie een andere voorkeur hebben is overheidsinterventie op dit gebied dan ook noodzakelijk.

De rol die de regering kan spelen in de initiatie van de ontwikkeling van alternatieven voor aardolie is een zeer belangrijke. Zo kan de overheid rechtstreeks bepaalde steunmaatregelen voor een aantal projecten instellen en op die manier onderzoek naar en ontwikkeling van bepaalde technologieën direct bevorderen. Bovendien blijkt de overheid een belangrijke stimulerende rol voor privébedrijven te kunnen spelen via hun keuze voor bepaalde alternatieven (Foss et al. , 2008). Hierdoor blijkt namelijk de voorkeur van wetgevende instanties voor bepaalde alternatieven waardoor deze een grote aantrekkingskracht voor private ondernemingen krijgen. Ten slotte dient de overheid de ontwikkeling van alternatieven voor aardolie ook via bepaalde specifieke beleidsmaatregelen te ondersteunen. Deze kunnen nieuwe technologieën, die nog amper kunnen profiteren van schaalvoordelen en leereffecten, nu reeds marktcompetitiever maken. Lagere taken voor biobrandstoffen en de toekenning van subsidies aan gezinnen die groene stroom produceren zijn in dit kader lovenswaardige initiatieven. Een uitbreiding hiervan (ook naar andere technologieën) dient in elk geval overwogen te worden, zeker in tijden waarin de olieprijs op een te laag niveau staat om veelbelovende alternatieven vanzelf marktcompetitief te maken. De regering dient dan ook in de huidige situatie financiële inspanningen niet te schromen om afgevoerde investeringsprogramma's, zoals die ontstonden na de twee oliecrisisen, te vermijden.

Aanbeveling III: De energie- en aardolieproblematiek is geen geïsoleerde nationale aangelegenheid. De aanpak ervan dient dan ook multilateraal opgezet te worden. Er bestaat dus een nood aan een geïntegreerd Europees beleid op het vlak van energie, energievoorziening en de ontwikkeling van alternatieven.

Ondanks het feit dat België één van de grootste gemiddelde verbruiken van aardolie ter wereld kent, speelt het land in de totale consumptie van aardolie slechts een beperkte rol (BP, 2008). De impact die België kan hebben op de vermindering van de wereldwijde afhankelijkheid van aardolie en de veiligstelling van de welvaart verbonden aan verschillende aardolietoepassingen is dan ook klein. Bovendien heeft een louter nationaal beleid op dit vlak tot gevolg dat er een duplicatie van inspanningen kan ontstaan omwille van een beperkte afstemming tussen landen met elk een eigen agenda. Dit houdt vanzelfsprekend in dat er inefficiënt wordt omgegaan met de beschikbare middelen en bepaalde kansen verloren gaan.

Het is daarom van belang het Belgische beleid op het vlak van deze kwesties te kaderen in een multilateraal samenwerkingsverband. Vanwege de steeds uitbreidende macht en legitimiteit van de Europese Unie lijkt een implementatie op dit niveau dan ook aangewezen. De in het verleden ondernomen stappen in deze richting dienen dan ook toegejuicht te worden en moeten dienen als tussenstap naar verregaandere maatregelen. Zo heeft de EU recentelijk een algemene routekaart voor de ontwikkeling van hernieuwbare energiebronnen uitgebracht (Commissie van de Europese Gemeenschappen, 2007). In deze routekaart werd door middel van het vastleggen van een bindend streefcijfer betracht het aandeel van hernieuwbare energiebronnen tegen 2020 op 20 procent van het totale energieverbruik te krijgen. Voor biobrandstoffen werd een minimumdoelstelling van 10 procent vooropgesteld. Aangezien uit vaststellingen van de Europese Unie blijkt dat eerder opgestelde doelen inzake alternatieve energiebronnen niet behaald werden, is het dan ook noodzakelijk om op dit vlak een krachtig en eenduidig beleid te ontwikkelen. Hierbij dient passende aandacht worden gegeven aan het veiligstellen van de energiebevoorrading, in combinatie met de nu vaak nagestreefde vermindering van de uitstoot van broeikasgassen.

Ten slotte is de Europese Unie hét instrument bij uitstek om een sterke positie te bekomen bij internationale onderhandelingen op het vlak van de energieproblematiek. Omdat alle aangesloten landen met één stem spreken wordt hun boodschap beter gehoord door de rest van de wereld en kunnen de vooropgestelde doelstellingen beter bereikt worden (Commissie van de Europese Gemeenschappen, 2007). Het onderhouden van goede relaties met energieproducerende landen en doorvoerlanden zal bovendien, vanwege een sterke machtspositie van de EU, met het oog op een bevoorradingzekerheid positieve gevolgen hebben. Ten slotte is het, vanwege een centralisatie van de belangen van alle lidstaten, via de Europese organen gemakkelijker om stappen te ondernemen in een globale aanpak van energiekwesties in het algemeen en piekolie in het bijzonder.

Lijst van afkortingen

ABS : acrylonitril-butadien-styreen
APPE : Association of Petrochemical Producers in Europe
Avgas : aviation gasoline
BBP : bruto binnenlands product
BTL : Biomass-To-Liquids
CCS : Carbon Capture and Storage
CNG : Compressed Natural Gas
CTG : Coal-To-Gas
CTL : Coal-To-Liquids
E85 : Ethanol-85
EROEI : energy returned on energy invested
EUR : estimated ultimate recovery
FAME : fatty acid methyl ester
GTL : Gas-To-Liquids
IEA : International Energy Agency
LNG : Liquefied Natural Gas
LPG : Liquefied Petroleum Gas
MJ : megajoule
MTBE : methyl-tert-butylether
Mtoe : Million tons of oil equivalent
NBR : nitril-butadien-rubber
OECD : Organisation for Economic Cooperation and Development
OPEC : Organization of the Petroleum Exporting Countries
PBS : PolyButylene Succinate
PIS : PolyIsosorbide Succinate
R/P-ratio : reserves-to-production ratio
SAN : styreen-acrylonitril
SBR : styreen-butadien rubber
TNT : trinitrotolueen

Lijst van tabellen

Tabel 2.1: Voorspellingen rond het pieken van de aardolieproductie	15
Tabel 3.1: Procentuele invloed van een stijging van de aardolieprijs met 40 procent op belangrijke economische indicatoren in ontwikkelingslanden, in jaar 1 na de stijging	25
Tabel 4.1: Elementen die voorkomen in aardolie en hun aandeel in de samenstelling ervan	29
Tabel 4.2: De verschillende aardolieproducten met hun toepassingen en hun relatief aandeel in het totale verbruik van aardolieproducten	54
Tabel 5.1: Alternatieven voor aardolie en hun belangrijkste toepassingsgebieden	79

Lijst van figuren

Figuur 2.1: Het vormingsproces van aardolie	8
Figuur 2.2: De opbouw van een aardoliereservoir	9
Figuur 2.3: Bewezen aardoliereserves per regio op het einde van 2007	11
Figuur 2.4: De reserves-productieratio: globaal en per regio	12
Figuur 2.5: Hubbert's voorspelling voor het verloop van de aardolieproductie in de Verenigde Staten	14
Figuur 2.6: Landen waar de aardolieproductie al dan niet zijn piek bereikt heeft	16
Figuur 3.1: Voorbije en verwachte evolutie van de wereldwijde energiebehoefte	17
Figuur 3.2: Evolutie van het verbruik van de verschillende primaire energiebronnen tegen 2030, globaal en per regio	18
Figuur 3.3: Wereldwijde aardolieconsumptie per capita in 2007, in ton	19
Figuur 3.4: Samenstelling van de Belgische vraag naar primaire energie	20
Figuur 3.5: Relatie tussen hoge olieprijs en recessies in de Verenigde Staten in de periode 1969-2003	23
Figuur 3.6: Procentuele invloed van een stijging van de aardolieprijs met 40 procent op belangrijke economische indicatoren, in jaar 1 respectievelijk jaar 2 na de stijging	24
Figuur 4.1: Schematisch overzicht van de processen in een raffinaderij	30
Figuur 4.2: Primaire en intermediaire petrochemicaliën	44
Figuur 4.3: Petrochemicaliën en bijhorende producten geproduceerd uit aromaten	49
Figuur 4.4 : Wereldwijd gebruik van aardolie per toepassingsgebied	52

Figuur 4.5: Belgisch gebruik van aardolie per toepassingsgebied, in 1000 ton	52
Figuur 4.6: Wereldwijd aardolieverbruik opgesplitst naar productcategorieën	53
Figuur 4.7 : Procentueel Belgische verbruik van aardolieproducten	53
Figuur 5.1: Het werkingsprincipe van een waterkrachtcentrale	55
Figuur 5.2: Gebieden met het grootste potentieel voor energiewinning uit golf-en getijdenkracht	57
Figuur 5.3: Directe toepassingen van geothermische energie	58
Figuur 5.4: Mogelijke toepassingsgebieden van oceaanthermische energie	59
Figuur 5.5: Opbouw van een windmolen	60
Figuur 5.6: Wereldwijde verdeling van de gemiddelde invallende zonnestraling	61
Figuur 5.7: Het werkingsprincipe van een actief zonnearmtesysteem	62
Figuur 5.8: Het werkingsprincipe van een zonnecel	63
Figuur 5.9: Het werkingsprincipe van een brandstofcel	65
Figuur 5.10: Historisch en voorspeld gebruik van aardgas per toepassingsgebied	68
Figuur 5.11: Wereldwijde procentuele gebruik van steenkool per toepassingsgebied	70
Figuur 5.12: Wereldwijde procentuele olieschalieverbruik per toepassinggebied	73
Figuur 5.13: Huidige en verwachte productie van alternatieve transportvloeistoffen	80
Figuur 6.1: investeringen in alternatieve energiebronnen ingedeeld per investeerder en per technologie	84
Figuur 6.2: Organigram van DSM	87
Figuur 6.3: De verschillende functionele afdelingen binnen DSM en hun doelmarkten	89
Figuur 6.4: De invloed van witte biotechnologie op drie belangrijke deeldomeinen	91

Figuur 6.5: Relatief aandeel van witte biotechnologie in totale verkoop van chemicaliën	93
Figuur 6.6: Verkopen van producten uit witte biotechnologie per deelcategorie	94
Figuur 6.7: De waardeketen van industriële biotechnologie en de aansluitende competenties van DSM	95
Figuur 6.8: De waardeketen voor biogebaseerde materialen en de aansluitende competenties van DSM	95
Figuur 6.9: Positie van de samenwerking tussen DSM en Roquette in de waardeketen	97
Figuur 6.10: Mogelijke producten op basis van biogebaseerd barnsteenzuur	97

Lijst van de geraadpleegde werken

Abu-Khader, M. M. (2009). Recent advances in nuclear power: A review. *Progress in Nuclear Energy*, 51 , 225-235.

Achilias, D. S., & Karayannidis, G. P. (2007). Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate). *Macromolecular Materials and Engineering*, 292 , 128-146.

Adamopoulos, L., Argyropoulos, D. S., Gaspar, A. R., & Lucia, L. A. (2006). Chemicals and energy from biomass. *Canadian Journal of Chemistry*, 84 , 960-970.

Aguilera, R. F., Eggert, R. G., Lagos, G., & Tilton, J. E. (2009). Depletion and the Future Availability of Petroleum Resources. *The Energy Journal*, 30 , 141-174.

Ahlgren, S., Baky, A., Bernesson, S., Nordberg, A., Norén, O., & Hansson, P.-O. (2008). Ammonium nitrate fertiliser production based on biomass – Environmental effects from a life cycle perspective. *Bioresource Technology*, 99 , 8034-8041.

Ajayi, T. R., Akinlua, A., Tchokossa, P., & Torto, N. (2009). Natural radioactivity and trace metals in crude oils: implication for health. *Environmental Geochemistry and Health*, 31 , 61-69.

Ali, M. F., El Ali, B. M., & Speight, J. G. (2005). *Handbook of industrial chemistry. Organic Chemicals*. New York: McGraw-Hill.

Allen, J. E., Armstrong, F. W., & Denning, R. M. (1997). Fuel-related issues concerning the future of aviation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 211 , 1-11.

Al-Muslim, H., & Dincer, I. (2005). Thermodynamic analysis of crude oil distillation systems. *International Journal of Energy Research* , 637-655.

American Petroleum Institute. (1998). *All About Petroleum*. Opgeroepen op 25 september 2008, van <http://www.classroom-energy.org/>: <http://www.classroom-energy.org/energy-education/teachers/petroleum/aboutpetroleum01.html>

Ariasa, P. L., Barrio, V. L., Cambraa, J. F., Gandarias, I., Güemez, M. B., & Requies, J. (2008). From biomass to fuels: Hydrotreating of oxygenated compounds . *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 , 3485-3488.

Armenante, M., Apicella, B., Di Palma, T. M., Spinelli, N., Velotta, R., & Wang, X. (2007). A mass spectrometric study of gasoline anti-knocking additives: Part I: Electron impact ionization and fragmentation processes of MTBE. *International Journal of Mass Spectrometry*, 262 , 105-113.

Association of petrochemicals producers in Europe. (2005). *Petrochemicals make things happen*. Opgeroepen op 13 februari 2009, van Association of Petrochemicals Producers in Europe: <http://www.petrochemistry.net/flowchart/flowchart.htm>

Association of Plastics Manufacturers. (z.d.). *Polyolefins*. Opgeroepen op 10 januari 2009, van PlasticsEurope: <http://www.plasticseurope.org/Content/Default.asp?PageID=1189>

Axley, J. W., Brandt-Rauf, P., Kaplan, M. B., Sewell, G. H., & Shen, T. T. (1993). Residential releases of number 2 fuel oil: a contributor to indoor air pollution. *The American Journal of Public Health*, *83*, 84-88.

Azar, C., Lindgren, K., Larson, E., & Möllersten, K. (2006). Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass - costs and potential role in stabilizing the atmosphere. *Climatic Change*, *74*, 47-79.

Bailiec, A., Dougherty, W., Fencla, A., Karthaa, S., Lazarusa, M., Rajanb, C., et al. (2009). Greenhouse gas reduction benefits and costs of a large-scale transition to hydrogen in the USA. *Energy Policy*, *37*, 56-67.

Bakis, R. (2007). Electricity production opportunities from multipurpose dams (case study). *Renewable Energy*, *32*, 1723-1738.

Balaban, O., & Tsatskin, A. (2008). Peak oil in the light of oil formation theories. *Energy Policy*, *36*, 1826-1828.

Baldi, G., Bernardi, M., & Grieco, G. (2008). Styrene–butadiene rubber pyrolysis: Products, kinetics, modelling. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *82*, 304-311.

Ball, M., & Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen – opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, *34*, 615-627.

Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *6*, 3-65.

Barreras, F., Ferreira, G., García, G. A., Lincheta, E., & Lozano, A. (2009). Design optimization of twin-fluid atomizers with an internal mixing chamber for heavy fuel oils. *Fuel processing technology*, *90*, 270-278.

Bartis, J. T., Cecchine, G., Dixon, L., LaTourette, T., & Peterson, D. J. (2005). *Oil Shale Development in the United States. Prospects and Policy Issues*. Opgeroepen op 3 februari 2009, van Rand Corporation: http://www.rand.org/pubs/monographs/2005/RAND_MG414.pdf

Basu, S., & Keshav, T. R. (2007). Gas-to-liquid technologies: India's perspective. *Fuel Processing Technology*, *88*, 493-500.

Bayraktar, H., & Durgun, O. (2005). Investigating the effects of LPG on spark ignition engine combustion and performance. *Energy Conversion and Management*, *46*, 2317-2333.

- Beatrice, C., Frusteri, F., Guido, C., & Spadaro, L. (2007). Oxygenated additives production for diesel engine emission improvement . *Chemical Engineering Journal*, 134 , 239-245.
- Belgische Petroleum Federatie. (2007a). *Jaarverslag 2007*. Opgeroepen op 14 maart 2009, van Belgische Petroleum Federatie: http://www.petrolfed.be/common/rapports/jaarverslag_2007.pdf
- Belgische Petroleum Federatie. (2007b). *Memorandum van de Belgische Petroleum Federatie gericht aan de politieke partijen betrokken bij het formatieberaad*. Opgeroepen op 14 oktober 2008, van Belgische Petroleum Federatie:
http://www.petrolfed.be/dutch/publicaties/20071221_BPF_memorandum.pdf
- Belgische Petroleum Federatie. (2009). *Omzettingsfactoren*. Opgeroepen op 14 januari 2009, van Belgische Petroleum Federatie: http://www.petrolfed.be/dutch/faq/faq_omzettingsfactoren.htm
- BGSU American Culture Studies Program. (z.d.). *John D. and Standard Oil*. Opgeroepen op 18 oktober 2008, van BGSU: <http://www.bgsu.edu/departments/acs/1890s/rockefeller/bio2.htm>
- Binedell, M., Diab, R. D., Hounscome, R., & Muller, E. (2003). Health risk assessment of kerosene usage in an informal settlement in Durban, South Africa . *Atmospheric Environment*, 37 , 2015-2022.
- Blanchard, O. J., & Galí, J. (2007). *The Macroeconomic Effects of Oil Price Shocks: Why are the 2000s so different from the 1970s?* Opgeroepen op 12 januari 2009, van CREI:
http://www.crei.cat/people/gali/pdf_files/bgoil07wp.pdf
- Blanchette, S. J. (2008). A hydrogen economy and its impact on the world as we know it . *Energy Policy*, 36 , 522-530.
- Boesmans, B., Barthelmie, R. J., Henderson, A. R., Morgan, C., Smith, B., & Sørensen, H. C. (2003). Offshore wind energy in Europe— a review of the state-of-the-art. *Wind Energy*, 6 , 35-52.
- Borzaev, B., Kapustin, V., & Karpov, S. (2007). Multifunctional additives for automotive gasolines. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 43 , 108-113.
- BP. (2007). *Sustainability report 2007*. Opgeroepen op 4 april 2009, van BP:
http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/STAGING/global_assets/e_s_assets/downloads/bp_sustainability_report_2007.pdf
- BP. (2008). *BP Statistical Review of World Energy June 2008*. Opgeroepen op 28 juli 2008, van <http://www.bp.com/statisticalreview>
- Brammerd, J., Huangc, Y., Rezvanic, S., Rogers, J., Thornley, P., & Uphamb, P. (2009). Integrated assessment of bioelectricity technology options . *Energy Policy*, 37 , 890-903.
- Brendow, K. (2003). Global oil shale issues and perspectives. *Oil Shale*, 20 , 81-92.

- Brown, P. H., Magee, D., & Xu, Y. (2008). Socioeconomic vulnerability in China's hydropower development. *China Economic Review*, 19 , 614-627.
- Bryers, R. W. (1995). Utilization of petroleum coke and petroleum coke/coal blends as a means of steam raising . *Fuel Processing Technology*, 44 , 121-141.
- Burdick, D. L., & Leffler, W. L. (1990). *Petrochemicals in nontechnical language* (2nd ed.). Tulsa: PennWell.
- Bustnes, O.-E., Datta, E. K., Glasgow, N. J., Koomey, J. G., & Lovins, A. B. (2005). *Winning the Oil Endgame. Innovation for Profit, Jobs and Security*. Snowmass: Rocky Mountain Institute.
- Campbell, C. J., & Laherrère, J. H. (1998). *The End of Cheap Oil*. Opgeroepen op 18 oktober 2008, van <http://dieoff.org/page140.pdf>
- Cathonnet, M., & Dagaut, P. (2006). The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32 , 48-92.
- Cavadias, S., & Machrafi, H. (2008). Three-stage autoignition of gasoline in an HCCI engine: An experimental and chemical kinetic modeling investigation. *Combustion and Flame*, 155 , 557-570.
- Cawdery, J., & Swoveland, C. (1989). Liquefied Petroleum Gas Transport: Analyzing R&D Options for Improved Safety . *Interfaces*, 19 (2) , 34-47.
- Chalmers, H., & Gibbins, J. (2008). Carbon Capture and Storage. *Energy Policy*, 36 , 4317-4322.
- Chang, C.-T., & Kuo, T.-H. (2008). Optimal planning strategy for the supply chains of light aromatic compounds in petrochemical industries . *Computers & Chemical Engineering*, 32 , 1147-1166 .
- Chang, Y.-C., Korai, Y., Mochida, I., & Sohn, H.-J. (1998). Anodic performances of coke from coals. *Carbon*, 36 , 1653-1662.
- Chazeau, L., Degrange, J.-M., Dudragne, G., Guerbé, L., Kapsa, P., Pelletier, J. M., et al. (2005). Influence of viscoelasticity on the tribological behaviour of carbon black filled nitrile rubber (NBR) for lip seal application. *Wear*, 259 , 684-692.
- Chen, J., & Zhao, Y. (1999). An efficient preparation method for superabsorbent polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 74 , 119-124.
- Chen, W.-S., Juan, C.-N., & Wei, K.-M. (2005). Mineralization of dinitrotoluenes and trinitrotoluene of spent acid in toluene nitration process by Fenton oxidation. *Chemosphere*, 60 , 1072-1079.
- Chevron. (n.d.). *Energy sources*. Opgeroepen op 4 april 2009, van Chevron: <http://www.chevron.com/deliveringenergy>
- Chisala, B. N., Lerner, D. N., & Tait, N. G. (2007). Evaluating the risks of methyl tertiary butyl ether (MTBE) pollution of urban groundwater . *Journal of Contaminant Hydrology*, 91 , 128-145.

- Choi, C. S., & Lee, S. H. (2000). Chemical activation of high sulfur petroleum cokes by alkali metal compounds. *Fuel Processing Technology*, 64 , 141-153.
- Chung, K. H., & Dai, Q. (1995). Bitumen-sand interaction in oil sand processing. *Fuel*, 74 , 1858-1864.
- Churzin, A. N., Danilov, A. M., Kovalev, V. A., & Mitusova, T. N. (2004). Organic Peroxides — Cetane-Increasing Additives for Diesel Fuels . *Chemistry and Technology of Fuel and Oils*, 39 , 330-333.
- Claassen, V. (2009). *A business perspective - Utilizing biotechnology to reach sustainable production of chemicals, materials and pharmaceuticals*. Opgeroepen op 13 april 2009, van http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Symbio/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Seminaarit/Biomass_workshop_240309/Tekes_Claassen_240309.pdf
- Clark, W. W. (2008). The green hydrogen paradigm shift: energy generation for stations to vehicles. *Utilities Policy*, 16 , 117-129.
- Clark, W. W., Lipman, T., O'Connor, T., Rambach, G., Rifkin, J., & Swisher, J. (2005). Hydrogen energy stations: along the roadside to the hydrogen economy. *Utilities Policy*, 13 , 41-50.
- Cleveland, C. J., Costanza, R., Hall, C. A., & Kaufmann, R. (1984). Energy and the U.S. economy: a biophysical perspective. *Science, New Series*, 225 , 890-897.
- Commissie van de Europese Gemeenschappen. (2007). *Mededeling van de Commissie aan de Raad en het Europees Parlement. Routekaart voor hernieuwbare energie. Hernieuwbare energiebronnen in the 21st eeuw: een duurzamere toekomst opbouwen* . Opgeroepen op 5 mei 2009, van Eur-Lex: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0848:FIN:NL:PDF>
- Cormos, C.-C., Peteves, S., Starr, F., & Tzimas, E. (2008). Innovative concepts for hydrogen production processes based on coal gasification with CO₂ capture. *International journal of hydrogen energy*, 33 , 1286-1294.
- Danilov, A. M., Mitusova, T. N., Okina, O. G., & Pugach, I. A. (2003). Increase in the Efficiency of Use of Furnace Residual Fuel Oil. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 39 , 6-9.
- DeCarolis, J. F., & Keith, D. W. (2006). The economics of large-scale wind power in a carbon constrained world. *Energy Policy*, 34 , 395-410.
- Delgado, M. A., Franco, J. M., Gallegos, C., Moreno, G., & Valencia, C. (2006). Processing and formulation of lithium lubricating greases. *AIP Conference Proceedings*, 832 , 257-262.
- Demirbas, A. (2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 35 , 4661-4670.
- D'Haeseleer, W. (2005). *Energie vandaag en morgen : beschouwingen over energievoorziening en -gebruik*. Leuven: Acco.

Di, Y., Huang, Z., Jiang, D., Liu, B., Miao, H., Ren, Y., et al. (2008). Combustion and emissions of a DI diesel engine fuelled with diesel-oxygenate blends. *Fuel*, 87 , 2691-2697.

Doeglas, D. J., Engelen, G. B., Maarleveld, G. C., Pannekoek, A. J., Rutten, M. G., van Straaten, L. M., et al. (1973). *Algemene geologie*. Groningen: Wolters Noordhoff.

Doğu, T., & Varişli, D. (2007). Alcohols as alternatives to petroleum for environmentally clean fuels and petrochemicals. *Turkish Journal of Chemistry*, 31 , 551-567.

Dolmatov, L. V. (2006). A comprehensive approach to processing asphalt from deasphalting of vacuum resid. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 42 , 94-99.

Dong, G., Hao, X., Li, Y., Yang, Y., & Xu, Y. (2007). Coal to liquid (CTL): commercialization prospects in China. *Chemical engineering & technology*, 30 , 1157-1165.

Dong, J.-J., Fang, L., Ni, Y., Sun, Z.-H., & Zheng, P. (2009). Fermentative production of succinic acid from straw hydrolysate by *Actinobacillus succinogenes*. *Bioresource Technology* 100 , 2425-2429.

Duffey, R. B. (2009). Nuclear production of hydrogen: When worlds collide. *International Journal of Energy Research*, 33 , 126–134.

Edwards, T., Harrison, W. E., Lander, H., & Maurice, L. Q. (2001). Advanced aviation fuels: a look ahead via a historical perspective . *Fuel*, 80 , 747-756.

Elliot, R. N., Langer, T., & Nadel, S. (2006). Reducing oil use through energy efficiency: Opportunities in the industrial sector. *Environmental Quality Management*, 15 (4) , 81-91.

Emura, T., & Saeki, Y. (2002). Technical progresses for PVC production . *Progress in Polymer Science*, 27 , 2055-2131 .

Encyclopedia Britannica. (2008). *Petroleum*. Opgeroepen op 28 oktober 2008, van Encyclopedia Britannica Online: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/454269/petroleum/50717/World-distribution-of-oil#ref=ref=ref=ref=ref502624>

Energy Information Administration. (2006). *Economic Effects of High Oil Prices*. Opgeroepen op 22 november 2008, van Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the U.S. Government: http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/otheranalysis/aeo_2006analysispapers/efhop.htm

Energy Information Administration. (2007a). *Annual Oil Market Chronology*. Opgeroepen op 14 maart 2009, van Energy Information Administration: <http://www.eia.doe.gov/cabs/AOMC/pdf.pdf>

Energy Information Administration. (2007b). *International Energy Outlook 2007*. Opgeroepen op 18 januari 2009, van Energy Information Administration: [http://tonto.eia.doe.gov/ftproot/forecasting/0484\(2007\).pdf](http://tonto.eia.doe.gov/ftproot/forecasting/0484(2007).pdf)

Energy Information Administration. (2008). *International Energy Outlook 2008*. Opgeroepen op januari 27, 2009, van Energy Information Administration: [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2008\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2008).pdf)

Enova, Innovation Norway, NVE & The Norwegian Research Council. (2007). *Renewable Energy*. Opgeroepen op 10 januari 2009, van RenewableEnergy.no: <http://www.renewableenergy.no/file.axd?fileID=12>

Esmundo, M., & Schilling, M. A. (2009). Technology S-curves in renewable energy alternatives: Analysis and implications for industry and government. *Energy Policy*, 37 , 1767-1781.

EuropaBio. (2003). *White biotechnology: gateway to a more sustainable future*. Opgeroepen op 13 april 2009, van EuropaBio: http://www.europabio.org/documents/100403/Innenseiten_final_screen.pdf

ExxonMobil. (2009). *2008 Financial and operating review*. Opgeroepen op april 4, 2009, van ExxonMobil: http://www.exxonmobil.com/Corporate/Files/news_pub_fo_2008.pdf

Faaij, A. P., & de Wit, M. P. (2007). Impact of hydrogen onboard storage technologies on the performance of hydrogen fuelled vehicles: a techno-economic well-to-wheel assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 , 4859-4870.

Fagan, A. (1991). *An introduction to the petroleum industry*. Opgeroepen op 28 september 2008, van Government of Newfoundland and Labrador: <http://www.nr.gov.nl.ca/mines&en/education/intro.pdf>

Fanchi, J. R. (2004). *Energy: Technology and directions for the future*. Burlington: Elsevier Academic Press.

Federaal Planbureau. (2007). *Energievoorzichten voor België tegen 2030 in een tijdperk van klimaatverandering*. Opgeroepen op 18 maart 2009, van Federal Planning Bureau. Economic analysis and forecast: http://www.plan.fgov.be/admin/uploaded/200711281000050.pp102_nl.pdf

Fedorak, P. M., Holowenko, F. M., & MacKinnon, M. D. (2002). Characterization of naphthenic acids in oil sands wastewaters by gas chromatography-mass spectrometry. *Water Research*, 36 , 2843-2855.

Financial Times. (2008). *Financial Times Global 500 2008*. Opgeroepen op 4 april 2009, van Financial Times: <http://media.ft.com/cms/889d77f0-4142-11dd-9661-0000779fd2ac.pdf>

FOD Economie, KMO, Middenstand en Energie. (2006). *Aardolie 2005. Feiten en Cijfers, Beleid en Gegevenstabellen*. Opgeroepen op 20 januari 2009, van National Instituut voor de Statistiek/ FOD Economie: http://www.statbel.fgov.be/studies/ac686_nl.pdf

Førsund, F. R. (2005). *Hydropower economics*. Opgeroepen op 12 januari 2009, van Department of Economics. University of Oslo: <http://www.oekonomi.uio.no/memo/memopdf/memo3005.pdf>

- Foss, M. M., Tanton, T., & Volkov, D. (2008). *Oil and gas industry investments in alternative energy, frontier hydrocarbons and advanced end-use technologies: An update*. Opgeroepen op 3 april 2009, van American Petroleum Institute. Facts on fuel:
http://www.factsonfuel.org/images/API_Emerging_Energy_Report.pdf
- Franco, J. M., Gallegos, C., Martín-Alfonso, J. E., Sánchez, M. C., & Valencia, C. (2007). Development of new lubricating grease formulations using recycled LDPE as rheology modifier additive. *European Polymer Journal*, *43*, 139-149.
- Fujita, R. M., & Pelc, R. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, *26*, 471-479.
- Garrett, V., & Koontz, T. M. (2008). Breaking the cycle: Producer and consumer perspectives on the non-adoption of passive solar housing in the US. *Energy Policy*, *36*, 1551-1556.
- Gary, J. H., & Handwerk, G. E. (2001). *Petroleum Refining. Technology and Economics* (4th ed.). New York: Marcel Dekker.
- Gielen, D., & Unander, F. (2005). *Alternative fuels: An Energy Technology Perspective*. Opgeroepen op 15 december 2008, van International Energy Agency:
<http://www.iea.org/textbase/papers/2005/etoaltfuels05.pdf>
- Gonçalves, M. L., da Mota, D. A., Ribeiro, D. A., Teixeira, A. M., & Teixeira, M. A. (2005). Thermal behavior of refinery atmospheric residue from some different oils. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *80*, 387-391.
- Greene, D. L., Hopson, J. L., & Li, J. (2006). Have we run out of oil yet? Oil peaking analysis from an optimist's perspective. *Energy Policy*, *34*, 515-531.
- Guardabassi, P., & Goldemberg, J. (2009). Are biofuels a feasible option? *Energy Policy*, *37*, 10-14.
- Guimarães, J. R., Lago, G. P., Österreicher-Cunha, P., da Silva, M. I., dos Santos Antunes, F., & Vargas, E. d. (2009). Effect of ethanol on the biodegradation of gasoline in an unsaturated tropical soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *63*, 208-216.
- Gunther, R., & Klepper, M. (2007). *Almanac of American Wealth. The Richest Americans*. Opgeroepen op 18 oktober 2008, van CNN Money:
<http://money.cnn.com/galleries/2007/fortune/0702/gallery.richestamericans.fortune/index.html>
- Gustafson, I., Petersson, M., & Stading, M. (2008). Ageing of two petroleum waxes. *Journal of Materials Science*, *43*, 1859-1868.
- Guthrie, V. B. (1960). *Petroleum Products Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Halgamuge, S., Manzie, C., & Watson, H. (2007). Fuel economy improvements for urban driving: Hybrid vs. intelligent vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *15*, 1-16.

- Hamilton, J. D. (2003). What is an oil shock? *Journal of Econometrics*, 113 , 363-398.
- Hammad, F. H., & Rashad, S. M. (2000). Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generating systems. *Applied Energy*, 65 , 211-229.
- Hanjalic, K., Lekic, A., & Van de Krol, R. (2008). *Sustainable Energy Technologies. Options and Prospects*. Dordrecht: Springer.
- Hatch, L. F., & Matar, S. (2001). *Chemistry of petrochemical processes* (2nd ed.). Houston: Gulf Publishing.
- van Haveren, J., Sanders, J., & Scott, E. L. (2007). Bulk chemicals from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2 , 41-57.
- Herron, J. (2009). *Focus: BP, Shell renewable invest cuts make business sense* . Opgeroepen op 4 april 2009, van The Wall Street Journal: <http://online.wsj.com/article/BT-CO-20090325-702786.html>
- Hesampour, M., Norouzbahari, S., & Roostaazad, R. (2009). Crude oil desalter effluent treatment by a hybrid UF/RO membrane separation process. *Desalination*, 238 , 174-182.
- Hirsch, R. L., Bezdek, R., & Wendling, R. (2005). *Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation, & Risk Management*. Opgeroepen op 13 augustus 2008, van http://www.netl.doe.gov/publications/others/pdf/Oil_Peaking_NETL.pdf
- Hirscher, M., Lamari-Darkrim, F., & Sakintuna, B. (2007). Metal hydridematerials for solid hydrogen storage: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 , 1121-1140.
- Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L., & Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139 , 244-260.
- Hope, C., & Méjean, A. (2008). Modelling the costs of non-conventional oil: A case study of Canadian bitumen. *Energy Policy*, 36 , 4205–4216.
- Hubbert, M. K. (1956). *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*. Opgeroepen op 14 november 2008, van Hubbert Peak of Oil Production: <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf>
- Husain, I. (2003). *Electric and hybrid vehicles. Design fundamentals*. Boca Raton: Taylor and Francis Group.
- Hyne, N. J. (2001). *Nontechnical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling and Production* (2nd ed.). Tulsa: Pennwell.
- Idem, R., & Simanzhenkov, V. (2003). *Crude Oil Chemistry*. New York: Marcel Dekker.

Innovation Norway. (2007). *Current and future energy sources - R&D in the U.S. oil & gas sector*.

Opgeroepen op 26 maart 2009, van Innovasjon Norge:

<http://www.innovasjon Norge.no/upload/houston/IN%20Reports/R&D%20in%20the%20US%20oil%20and%20gas%20sector.pdf>

International Energy Agency. (2004a). *Analysis of the Impact of High Oil Prices on the Global Economy*. Opgeroepen op 25 november 2008, van International Energy Agency:

http://www.iea.org/Textbase/Papers/2004/High_Oil_Prices.pdf

International Energy Agency. (2004b). *Biofuels for transport. An international perspective*.

Opgeroepen op 17 december 2008, van International Energy Agency:

<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/biofuels2004.pdf>

International Energy Agency. (2004c). *Hydrogen and fuel cells. Review of national R&D programs*.

Opgeroepen op 19 januari 2009, van International Energy Agency:

<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/hydrogen2005.pdf>

International Energy Agency. (2004d). *Oil crises and climate changes. 30 years of energy use in IEA countries*. Opgeroepen op 12 februari 2009, van International Energy Agency:

<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/30years.pdf>

International Energy Agency. (2006). *World Energy Outlook 2006*. Opgeroepen op 22 januari 2009,

van International Energy Agency: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/weo2006.pdf>

International Energy Agency. (2007). *Natural Gas Market Review 2007. Security in a globalising market to 2007*. Opgeroepen op 25 januari 2009, van International Energy Agency:

<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/Gasmarket2007.pdf>.

International Energy Agency. (2008a). *Key World Energy Statistics 2008*. Opgeroepen op 23 januari 2009, van International Energy Agency:

http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/key_stats_2008.pdf

International Energy Agency. (2008b). *Medium-Term Oil Market Report*. Parijs: IEA Publications.

International Energy Agency. (2008c). *Oil Information 2008*. Parijs: IEA Publications.

International Energy Agency. (2008d). *World Energy Outlook 2008. Key graphs*. Opgeroepen op 15 januari 2009, van World Energy Outlook:

http://www.worldenergyoutlook.org/key_graphs_08/WEO_2008_Key_Graphs.pdf

International Energy Agency. (2009). *Oil Market Report. 11 Februari 2009*. Opgeroepen op 7 april 2009, van Oil Market Report: <http://omrpublic.iea.org/omrarchive/11feb09full.pdf>

Investopedia. (z.d.). *Posted Price*. Opgeroepen op December 5, 2008, van Investopedia. A Forbes Digital Company: http://www.investopedia.com/terms/p/posted_price.asp

Javanmardi, J., Moshfeghian, M., Najibi, H., Nasrifar, K., & Rezaei, R. (in press). Economic evaluation of natural gas transportation from Iran's South-Pars gas field to market. *Applied Thermal Engineering*

Jentsch, M. F., Müller, G., & Stoddart, E. (2009). Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings. *Renewable Energy*, 34 , 1407-1412.

Johansson, B. (1999). The economy of alternative fuels when including the cost of air pollution . *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 4 , 91-108.

Johnsson, F., & Kjärstad, J. (2009). Resources and future supply of oil. *Energy Policy*, 37 , 441-464.

Jones, D. S., & Pujadó, P. R. (2006). *Handbook of petroleum processing*. Dordrecht: Springer.

Jones, D. W., Leiby, P. N., & Paik, I. K. (2004). Oil Price Shocks and the Macroeconomy: What Has Been Learned Since 1996. *The Energy Journal*, 25 , 1-32.

Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (2007). *Renewable Energy. Technology, Economics and Environment*. Heidelberg: Springer.

Kaufmann, R. K., & Shiers, L. D. (2008). Alternatives to Conventional Crude Oil: When, How Quickly and Market Driven? *Ecological Economics*, 67 , 405-411.

Kidnay, A. J., & Parrish, W. R. (2006). *Fundamentals of Natural Gas Processing*. Boca Raton: Taylor and Francis Group.

Klass, D. L. (1998). *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals* . San Diego: Elsevier.

Knothe, G., Matheaus, A. C., & Ryan, T. W. (2003). Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester. *Fuel*, 82 , 971-975.

Kornev, A. Y., Ostrikov, V. V., & Tupotilov, N. N. (2008). Finely disperse minerals as antiwear additives for lube oils. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 44 , 29-33.

Kosnik, L. (2008). The potential of water power in the fight against global warming in the US. *Energy Policy*, 36 , 3252-3265.

Kyriakis, N., Oxizidis, S., & Papadopoulos, A. M. (2003). Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air-conditioning sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7 , 419–438.

Lardic, S., & Mignon, V. (2008). Oil prices and economic activity: An asymmetric cointegration approach. *Energy Economics*, 30 , 847-855.

- Larson, E. D., & Williams, R. H. (2003). A comparison of direct and indirect liquefaction technologies for making fluid fuels from coal. *Energy for Sustainable Development*, 7 (4) , 103-129.
- Leder, F., & Shapiro, J. N. (2008). This time it's different. An inevitable decline in world petroleum production will keep oil product prices high, causing military conflicts and shifting wealth and power from democracies to authoritarian regimes. *Energy Policy*, 36 , 2850-2852.
- Lee, M. (2000). *A Review of Titan. The life of John D. Rockefeller, sr. by Ron Chernow*. Opgeroepen op 18 oktober 2008, van American National Business Hall of Fame: <http://www.anbhf.org/pdf/lee.pdf>
- Lee, S., Loyalka, S. K., & Speight, J. G. (2007). *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. Boca Raton: Taylor and Francis Group.
- Leff, J. (2008). *Oil slips 0.5 pct after record \$11 surge to new high*. Opgeroepen op 24 oktober 2008, van Reuters: <http://www.reuters.com/article/newsOne/idUSREE06478120080608?pageNumber=1&virtualBrandChannel=0>
- Lund, J. W. (1997). Direct heat utilization of geothermal resources. *Renewable Energy*, 10 , 403-408.
- Marshall, A. G., & Rodgers, R. P. (2008). Petroleomics: Chemistry of the underworld. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 , 18090-18095.
- McKinsey & Company. (2009). *White biotechnology*. Opgeroepen op 13 april 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/en_US/downloads/sustainability/white_biotech_mckinsey_feb_2009.pdf
- Meyers, R. A. (2004). *Handbook of Petroleum Refining Processes* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Miller, B. G. (2005). *Coal Energy Systems*. Burlington: Elsevier Academic Press.
- Minchener, A. J. (2005). Coal gasification for advanced power generation. *Fuel*, 84 , 2222-2235.
- Mokhatab, S., Poe, W. A., & Speight, J. G. (2006). *Handbook of natural gas transmission and processing*. Burlington: Gulf Professional Publishing.
- Molnár, Á., & Olah, G. A. (2003). *Hydrocarbon chemistry*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Moran, D. (2006). *A Sustainability Assessment of Non Conventional Fossil Fuel Resources* -. Opgeroepen op 29 januari 2009, van http://oldspeak.net/writing/Moran_Energy_Paper_rev1.pdf
- Mostafazadeh, A. K., & Rahimpour, M. R. (2009). A membrane catalytic bed concept for naphtha reforming in the presence of catalyst deactivation . *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48 , 683-694 .

National Renewable Energy Laboratory & Pacific Northwest National Laboratory. (2004). *Top Value Added Chemicals from Biomass . Volume I—Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*. Opgeroepen op 15 februari 2009, van US Department of Energy: <http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/35523.pdf>

National Energy Board. (2006). *Canada's Oil Sands. Opportunities and Challenges to 2015: An update*. Opgeroepen op 5 februari 2009, van National Energy Board: <http://www.neb.gc.ca/clf-nsi/rnrgynfmetn/nrgyrprt/lsnd/pprntnsndchllngs20152006/pprntnsndchllngs20152006-eng.pdf>

National Energy Technology Laboratory. (2007). *Peaking of World Oil Production: Recent Forecasts*. Opgeroepen op 10 augustus 2008, van <http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/Peaking%20of%20World%20Oil%20Production%20-%20Recent%20Forecasts%20-%20NETL%20Re.pdf>

Noorman, H. (2008). *Industrial biotechnology products via fermentation*. Opgeroepen op 12 april 2009, van Biotechnology industry organisation: http://www.bio.org/ind/wc/08/breakout_pdfs/20080430/Track3_ContinentalC/Session10_430pm600pm/Noorman_Continental_C_Wed.pdf

OECD. (z.d.). *OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development*. Opgeroepen op 8 december 2008, van OECD: <http://www.oecd.org/dataoecd/29/23/40515860.ppt>

Olieh, M. N., Omole, O., & Osinowo, T. (1999). Thermal visbreaking of heavy oil from the Nigerian tar sand. *Fuel*, 78 , 1489-1496.

Omer, A. M. (2008). Focus on low carbon technologies: the positive solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 , 2331-2357.

Ono, Y. (2003). A survey of the mechanism in catalytic isomerization of alkanes. *Catalysis Today*, 81 , 3-16.

OPEC. (2009). *Frequently asked questions*. Opgeroepen op 20 maart 2009, van <http://www.opec.org/library/what%20is%20OPEC/FAQ.pdf>

Park, D. (2008). *Macroeconomic effects of high oil prices*. Opgeroepen op 4 december 2008, van Asian Development Bank: <http://www.adb.org/Documents/Books/ADO/2008/Update/Part02-Macro.pdf>

Parra, F. (2004). *Oil Politics. A modern history of petroleum*. Londen: LB Taurus & Co.

Peak Oil Netherlands Foundation. (2005). *World Oil Production and Peaking Outlook*. Opgeroepen op 16 november 2008, van Peakoil Nederland: http://www.peakoil.nl/wp-content/uploads/2006/09/asponl_2005_report.pdf

Pearce, J. M. (2002). Photovoltaics - a path to sustainable futures. *Futures*, 34 , 663-674.

Pees, S. T. (2004a). *Introduction to oil history*. Opgeroepen op 24 november 2008, van Oil History: <http://www.petroleumhistory.org/OilHistory/pages/intro.html>

Pees, S. T. (2004b). *Whale Oil Versus The Others*. Opgeroepen op 15 oktober 2008, van Oil History: <http://www.petroleumhistory.org/OilHistory/pages/Whale/whale.html>

Petrov, P. A., & Sharikov, Y. V. (2007). Universal model for catalytic reforming. *Chemical and Petroleum Engineering*, 43 , 580-584.

Pouris, A., & Wentzel, M. (2007). The development impact of solar cookers: A review of solar cooking impact research in South Africa. *Energy Policy*, 35 , 1909-1919.

Reinsalu, E., Valgma, I., & Väli, E. (2008). Usage of Estonian oil shale. *Oil Shale*, 25 (Special 2) , 101-114.

Roquette. (2009). *Press kit summary*. Opgeroepen op 17 april, 2009, van Roquette corporate website: http://www.roquette.com/deliaRessource/ressource_id-2916/ressource_url-/deliamedia29/2916_f9155f.pdf

Roquette. (z.d.). *BioHub: development program of new cereal bio-refineries based on cereals*. Opgeroepen op 16 april 2009, van Roquette corporate website: http://www.roquette.com/delia-CMS/t2_print/article_id-3557/topic_id-1145/biohub-r-development-program-of-new-cereal-bio-refineries-based-on-cereals.html

da Rosa, A. V. (2005). *Fundamentals of Renewable Energy Processes*. Burlington: Elsevier Academic Press.

Royal DSM N.V. (2003). *Location finder*. Opgeroepen op maart 27, 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/nl_NL/html/about/location_finder.htm

Royal DSM N.V. (2004a). *DSM business locator*. Opgeroepen op 26 maart 2009, van Royal DSM N.V.: http://www3.dsm.com/hostedapplications/businesslocator/_down/_nl/business_locator.pdf

Royal DSM N.V. (2004b). *Industrial (white) biotechnology. An effective route to increase EU innovation and sustainable growth. Position document on industrial biotechnology in Europe and the Netherlands*. Opgeroepen op 7 april 2009, van Europabio: <http://www.europabio.org/positions/DSM-WB.pdf>

Royal DSM N.V. (2008a). *DSM company profile*. Opgeroepen op 18 maart 2009, van DSM: http://www.dsm.com/en_US/downloads/about/corporate_brochure_2008.pdf

Royal DSM N.V. (2008b). *DSM position on white biotechnology*. Opgeroepen op 12 april 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/en_US/downloads/sustainability/white_biotech_position_paper_en.pdf

- Royal DSM N.V. (2008c). *Emerging business areas*. Opgeroepen op 27 maart 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/nl_NL/html/innovation/new_emerging_business_areas.htm
- Royal DSM N.V. (2008d). *Koninklijke DSM N.V. Jaarverslag 2008. Life Sciences and Materials Sciences. Staying the course*. Opgeroepen op 25 maart 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/en_US/downloads/invest/annual_report_2008_nl.pdf
- Royal DSM N.V. (2008e). *Overzicht van de activiteiten*. Opgeroepen op 24 maart 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/nl_NL/html/about/activities.htm
- Royal DSM N.V. (2008f). *The Life Sciences and Materials Sciences Company. Our strategy, ambition, responsibility and innovations*. Opgeroepen op 25 maart 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/en_US/downloads/about/company_presentation.pdf
- Royal DSM N.V. (2009). *White technology backgrounder*. Opgeroepen op april 12, 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/en_US/downloads/sustainability/white_biotechnology_backgrounder_feb_2009.pdf
- Royal Dutch Shell. (2007). *Responsible Energy. The Shell Sustainability Report 2007*. Opgeroepen op 4 april 2009, van Royal Dutch Shell: http://www-static.shell.com/static/responsible_energy/downloads/sustainability_reports/shell_sustainability_report_2007.pdf
- Royal Dutch Shell. (2009). *Royal Dutch Shell plc annual report and form 20-F for the year ended december 31, 2008*. Opgeroepen op 4 april 2009, van Royal Dutch Shell: http://www.annualreportandform20f.shell.com/2008/servicepages/downloads/files/download.php?file=entire_shell_20f_08.pdf
- Royal Dutch Shell. (z.d.). *AVGAS Grades and Specifications*. Opgeroepen op 14 december 2008, van Shell Aviation: http://www.shell.com/home/content/aviation-en/productservice/aviationfuels/detail/avgasgradesspecs_10081006.html
- Rupp-Dahlem, C., & van den Tweel, W. (2008). *Bio-succinic acid : an attractive product for biorefineries*. Opgeroepen op 15 april 2009, van <http://www.rrbconference.org/bestanden/downloads/142.pdf>
- Sapukotana, N. (1996). *The History of the Standard Oil Company by Ida M. Tarbell*. Opgeroepen op 16 oktober 2008, van <http://www.history.rochester.edu/fuels/tarbell/MAIN.HTM>
- Schobert, H. H., & Song, C. (1996). Non-fuel uses of coals and synthesis of chemicals and materials . *Fuel*, 75 , 724-736.
- Schobert, H. H., & Song, C. (2002). Chemicals and materials from coal in the 21st century . *Fuel*, 81 , 15-32.

Senauer, B. (2008). Food market effects of a global resource shift toward bioenergy. *American Journal of Agricultural Economics*, 90 , 1226-1232.

Sijbesma, F. (2009). *DSM and White Biotechnology*. Opgeroepen op 18 april 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/en_US/downloads/media/biovision_2009_white_biotech.pdf

Solnik, C. (2008, december 31). Alternative energy interest falls with oil prices. *Long Island Business News* .

Sørensen, B. (2004). *Renewable Energy. Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects*. (3rd ed.). Amsterdam: Elsevier Science.

Speight, J. G. (2002). *Handbook of Petroleum Product Analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Speight, J. G. (2006). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (4th ed.). Boca Raton: Taylor and Francis Group.

Stern, N. (2006). *Stern Review on the Economics of Climate Change*. Opgeroepen op 10 mei, 2009, van Her Majesty's Treasury: http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm

Takeshita, T., & Yamaji, K. (2008). Important roles of Fischer–Tropsch synfuels in the global energy future . *Energy Policy*, 36 , 2773-2784 .

Tanda, S. (2009). *Life Sciences and Material Sciences*. Opgeroepen op 16 april 2009, van Royal DSM N.V.: http://www.dsm.com/en_US/downloads/invest/STA_090326_brussels.pdf

Tanner, D. (1995). Ocean thermal energy conversion: current overview and future outlook. *Renewable Energy*, 6 , 367-373.

Telyashev, E. G., Obukhova, S. A., & Vezirov, R. R. (2006). New life for thermal processes. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 42 , 79-85.

Tennant, D. R. (2004). The usage, occurrence and dietary intakes of white mineral oils and waxes in Europe . *Food and Chemical Toxicology*, 42 , 481-492.

The Canadian Chemical Producers' Association. (1994). *Overview of the Canadian chemical manufacturing industry*. Opgeroepen op 5 december 2008, van Canada's chemical producers: http://www.ccpa.ca/files/Library/Reports/Overview_of_Chem_Manufacturing_Ind/CCMI06overview.pdf

The European Council of Vinyl Manufacturers. (z.d.). *How is PVC used?* Opgeroepen op 8 januari 2009, van The European Council of Vinyl Manufacturers: <http://www.pvc.org/PVC.org/How-is-PVC-Used>

The Oil Depletion Analysis Centre and Post Carbon Institute. (2008). *Preparing for Peak Oil. Local Authorities and the Energy Crisis*. Opgeroepen op 15 oktober 2008, van The Oil Depletion Analysis Centre: http://www.odac-info.org/sites/odac.postcarbon.org/files/Preparing_for_Peak_Oil.pdf

Thompson, G. R., & Turk, J. (2004). *Earth Science and the Environment* (3rd ed.). Florence: Brooks Cole.

Total. (2007). *Environment and society. Our corporate responsibilities 2007*. Opgeroepen op 4 april 2009, van Total: http://www.total.com/static/en/medias/topic1606/TOTAL_csr_en_2007.pdf

Twidell, J., & Weir, T. (2006). *Renewable Energy Resources* (2nd ed.). Londen: Taylor and Francis Group.

United States Congress, Office of Technology Assessment. (1980). *An assessment of oil shale technologies*. Opgeroepen op 3 februari 2009, van Princeton University: <http://www.princeton.edu/~ota/disk3/1980/8004/8004.PDF>

US Department of Labor. (z.d.). *OSHA Technical Manual, Section IV: Chapter 2. Petroleum Refining Processes*. Opgeroepen op 9 december 2008, van US Department of Labor. Occupational Safety & Health Administration: http://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iv/otm_iv_2.html#2

US Geological Survey. (1998). *1994 World Petroleum Futures (Oil)*. Opgeroepen op 6 november 2008, van USGS Publications Warehouse: http://pubs.usgs.gov/of/1998/of98-468/oil_futures.pdf

Vallentin, D. (2008). Policy drivers and barriers for coal-to-liquids (CtL) technologies in the United States. *Energy Policy* 36 , 3198-3211.

Van Vactor, S. A., & Ramberg, D. J. (2006). *Overview of the Oil Industry*. Opgeroepen op 17 oktober 2008, van http://www.bcsmain.com/mlists/files/nnsa/darkmountain/Overview_Oil_Industry.pdf

Venn, F. (2002). *The Oil Crisis*. Harlow: Pearson Education Limited.

Wauquier, J.-P. (1995). *Crude Oil Petroleum Products. Process Flowsheets*. Parijs: Editions Technip.

White, W. C. (2007). Butadiene production process overview. *Chemico-Biological Interactions*, 166 , 10-14.

World Coal Institute. (2005). *The Coal Resource. A comprehensive overview of coal*. Opgeroepen op 28 januari 2009, van World Coal Institute: http://www.worldcoal.org/assets_cm/files/PDF/thecoalresource.pdf

World Energy Council. (2007). *2007 Survey of Energy Resources*. Opgeroepen op 4 oktober 2008, van World Energy Council: http://www.worldenergy.org/documents/ser2007_final_online_version_1.pdf

Wubbolts, M. (2008). *Emerging business area white biotechnology. Industrial biotechnology - Towards next generation biorefineries*. Opgeroepen op 14 april 2009, van Chemelot:
<http://www.chemelot.nl/bestand.aspx?id=c2ecf7e0-0ef1-4686-8828-29fa9a822639>