

Energie opties voor de 21e eeuw

verslag van een studiegroep van PvdA-leden

onder redactie van Marc Beurskens, Heleen de Coninck en Egbert Boeker

17 juni 2004

Gebruikte afkortingen

1 MJ (Mega Joule) = 10^6 J

1 GJ (Giga Joule) = 10^9 J

1 TJ (Tera Joule) = 10^{12} J

1 PJ (Peta Joule) = 10^{15} J

1 EJ (Exa Joule) = 10^{18} J

Elektrische energie

1 TWh = (Tera Watt uur) = 10^{12} x 3600 Joule = 3.6 PJ of 0.0036 EJ

Elektrische Joules krijgen soms voor de duidelijkheid een extra e toegevoegd: Je of J_e.

Voorwoord door Paul Kalma

Wat voor veel problemen op het gebied van energie en milieu geldt, geldt ook voor de bestrijding van die problemen: ze betreft de lange termijn. De samenleving heeft tijd nodig om zich op noodzakelijke veranderingen in te stellen en om op een zuiniger en zorgvuldiger, meer duurzame manier met de natuurlijke omgeving om te gaan.

Toekomst-studies, die anticiperen op wat komen gaat en wat moet veranderen, zijn op dit terrein daarom van grote betekenis. Maar er kleven ook nadelen en risico's aan, zoals het beroemde rapport van de Club van Rome uit 1972 heeft laten zien. Een aantal waarschuwingen die het rapport bevatte, bleek achteraf voorbarig. Er was te weinig rekening gehouden met technologische vernieuwing en vervanging van schaarse door minder schaarse materialen.

Het enige dat er op zit is om de trends zo zorgvuldig mogelijk in kaart te brengen; de vooronderstellingen die men hanteert zo duidelijk mogelijk te expliciteren. Op basis daarvan kan dan het debat gevoerd worden over de (soms: zeer ingrijpende) keuzes waartoe de voorspelde ontwikkeling dwingt; over de prijs die betaald moet worden voor die keuze – en over de prijs die betaald moet worden als een keuze achterwege blijft.

De navolgende studie voldoet aan deze criteria. Tot stand gekomen op initiatief van een aantal deskundige PvdA-leden (binnen het verband van de Landelijke werkgroep milieu en energie van de PvdA) levert het gedegen en uitdagend discussiemateriaal op over een belangrijk politiek vraagstuk: de toekomst van de (nationale, Europese, mondiale) energievoorziening, in relatie tot economische ontwikkeling, voorzieningszekerheid en bescherming van natuur en milieu. De Wiardi Beckman Stichting publiceert het rapport met veel plezier op haar website (als eerste WBS-internet-uitgave) en zal de discussie over het rapport met kracht stimuleren. In dat kader verschijnt o.a. een samenvatting in het maandblad Socialisme & Democratie (zomer 2004) en wordt op 11 september van dit jaar een conferentie naar aanleiding van de studie georganiseerd.

We bedanken de auteurs, en de redacteurs onder hen in het bijzonder, hartelijk voor het vele werk dat in de voorbereiding van het rapport is gaan zitten.

Paul Kalma
directeur Wiardi Beckman Stichting

17 juni 2004

Redactioneel woord vooraf

Het idee voor een ad hoc werkgroep energie-opties is in het voorjaar van 2003 ontstaan in de koffiepauze van een bijeenkomst van de LME, de Landelijke werkgroep voor Milieu en Energie binnen de Partij van de Arbeid. De initiatiefnemers en huidige redactie werden bij het verzamelen van de benodigde personen met wetenschappelijke en praktische expertise ondersteund door het bestuur van de LME, die al haar leden via de email informeerde en ze namens de initiatiefnemers uitnodigde voor een eerste bijeenkomst.

Praktisch alle leden van de werkgroep energie-opties hebben actief meegeschreven en gediscussieerd. De stukken, die in dit rapport zijn opgenomen blijven voor verantwoordelijkheid van de diverse auteurs – al zijn de uitkomsten het resultaat van de discussie in de groep. Het laatste hoofdstuk, de eindconclusies van de redactie, is in de laatste, plenaire vergadering van 27 Mei 2004 vastgesteld. Op belangrijke punten waar individuele groepsleden van meningen bleven verschillen, is dat aangegeven.

De opzet van het rapport volgt de interimrapportage die ‘en marge’ van het PvdA congres in Groningen, december 2003, werd gepresenteerd. In een inleiding wordt de problematiek geschetst. De voorzieningszekerheid van energie via fossiele brandstoffen zal verminderen en voor olie en gas in de loop van de 21e eeuw afnemen tot nul. De uitstoot van CO₂ uit de verbranding van fossiele brandstoffen dreigt het klimaat sneller te veranderen dan het aanpassingsvermogen van de natuur en de mensheid kan verdragen. Ten slotte dreigen diverse ontwikkelingslanden in hun ontwikkeling te worden gefrustreerd omdat de rijkere landen alle brandstoffen voor hun eigen doeleinden benutten. Dat zijn allemaal redenen om uit te zien naar een energievoorziening met minder afhankelijkheid van de fossiele brandstoffen.

Het rapport vervolgt dan met de energie-opties in een systematische volgorde. Allereerst besparing op energie middels vraagvermindering (hoofdstuk 2). Dan het inzetten van hernieuwbare energiebronnen (hoofdstuk 3). Dan een beschrijving van de mogelijkheden om fossiele verbranding schoner maken en de resulterende CO₂ op te slaan (hoofdstuk 4). Kernenergie met de 2 varianten kernsplijting en kernfusie volgt in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 worden schattingen gemaakt van de bijdragen die alle beschouwde opties kunnen geven – en worden politieke keuzemomenten belicht door enkele eenvoudige scenarios te definiëren en los daarvan een optimale energievoorziening langs wiskundige weg te vinden. Bij dit laatste wordt gebruik gemaakt van een ‘consumentengids-achtige’ beoordeling van elk der energie-opties zoals die uit de groepsdiscussie naar voren kwam. Ten slotte wordt een korte beschouwing gewijd aan China als prototype van een zich snel ontwikkelende economie. Het rapport besluit met de eindconclusies (hoofdstuk 7) en enkele personalia van de leden van de groep.

Ten slotte gebruiken redactieleden Heleen de Coninck en Marc Beurskens het rapport als basis voor een artikel in Socialisme en Democratie.

Inhoud

Energie opties voor de 21e eeuw	1
Voorwoord door Paul Kalma.....	3
Redactioneel woord vooraf	4
Inhoud.....	5
1 Energie opties voor 21e eeuw door Marc Beurskens	8
Inleiding	8
Een groeiende vraag naar energie	9
Toekomstig energie verbruik.....	11
Energie en armoede.....	13
Voorzieningszekerheid van fossiele brandstoffen	16
Fossiele brandstoffen; reserves en voorraden	17
Klimaat verandering en broeikasgasemissies	18
Evaluatie	22
Op weg naar een duurzame energie huishouding	23
Een duurzame toekomst; verantwoordelijkheid van het Westen?	25
Toetsingscriteria energie opties	26
2 Energiebesparing	32
2.1 Besparing door Bert Ritter	32
Trias energetica.....	32
Begripsbepaling, wat is besparing en wat niet.....	32
Oplossingsrichtingen	34
Samenvatting en conclusie	40
2.2 De noodzaak van warmte-kracht koppeling (WKK) door Marco Mensink.....	42
Energie uitdagingen voor de komende 50 jaar.....	42
De sterke en zwakke punten van WKK	42
Wat WKK kan bijdragen aan de oplossing van het klimaatprobleem	43
Wat er moet gebeuren in Nederland.....	44
Samenvatting en conclusies voor hoofdstukken 2.1 en 2.2.....	44
3 Hernieuwbare bronnen van energie	46
3.1 Windenergie door Marc Beurskens	46
Huidige situatie	46
Fluctuerende energiebron	48
Productie van windenergie	49
Potentieel.....	49
Windenergie financieel.....	51
Punten van aandacht	53
Technologische ontwikkelingen	53
Samenvatting en conclusies	54
3.2 Zonne warmte door Teun Bokhoven	56
Stand van zaken.....	56
Schattingen	58
Karakteristieke eigenschappen	59
Samenvatting en conclusies	60
3.3 Zonne-elektriciteit (PV) door Marc Beurskens.....	62
Inleiding.....	62
Techniek	63
Inpasbaarheid en locatie	64
Kosten en opbrengsten	64

Potentieel en toekomstige ontwikkelingen.....	65
Groeipotentieel	65
Aandachtspunten	66
Samenvatting en conclusies	67
3.4 Elektriciteit uit waterkracht door Heleen de Coninck	68
Kosten en potentieel.....	68
Aandachtspunten	69
Samenvatting en Conclusies	70
3.5 Energie uit biomassa door Rokus Wijbrans	71
Definitie	71
Waarom biomassa	71
Typen biomassa	72
Voorwaarden voor verwerking	73
Voordelen van biomassa.....	74
Nadelen en/of risico's	74
Potentieel van biomassa	75
Omzetting van biomassa naar nuttige energie.....	77
Keuze voor welke route?.....	84
Grootschalig versus kleinschalig.....	89
Samenvatting en conclusies	90
3.6 Energie uit aardwarmte door Hendrik-Jan Bosch en Heleen de Coninck	93
Toekomstige ontwikkelingen	93
Kosten en milieugevolgen	94
Samenvatting en conclusies	94
3.7 Waterstof als energiedrager door Egbert Boeker en Rokus Wijbrans.....	96
Productie van waterstof.....	97
Vervoer en distributie van energiedragers.....	101
Omzetting van waterstof in elektrische energie	105
De Nederlandse transportsector	105
Samenvatting en conclusies	107
4 Schoner maken van fossiele brandstoffen	110
4.1 Schonere brandstof en efficiëntere conversie door Egbert Boeker	110
Electriciteitsproductie.....	110
Samenvatting en conclusies	113
4.2 CO ₂ - afvang en - opslag door Heleen de Coninck	115
Afvang.....	115
Transport	116
Geologische opslag.....	117
Samenvatting en Conclusies	120
5 Kernenergie.....	122
5.1 Kernsplijting door Egbert Boeker	122
Het principe.....	122
Samenvatting en conclusies voor traditionele kernenergie.....	125
De Hoge Temperatuur Reactor, HTR – opstapje naar de vierde generatie (?).	127
Samenvatting en conclusies	128
Nadere evaluatie door de groep (22-04-2004)	130
5.2 Kernfusie door Marc Beurskens	132
Het principe van kernfusie.....	132
50 jaar fusie onderzoek	132
De volgende ronde: proefmodellen.....	132

Brandstof	134
veiligheid	134
Kosten	135
Internationale samenwerking	135
Samenvatting en conclusies	136
6 Synthese	138
6.1 Implementatie van hernieuwbare bronnen in 2050 en 2100 door Egbert Boeker	138
Opslag en transport van elektrische energie	139
Schattingen van opbrengsten aan hernieuwbare energie per km ²	145
Energie-opties voor EU-15 en NL in 2050 en 2100	153
Conclusie	160
Aanbevelingen:	161
6.2 Prioriteiten analyse van de energieopties door Marc Beurskens	162
Politieke gewichten	162
Prioriteiten van de opties	163
Optimalisatie van de energiemix	164
Beperkingen van de prioriteiten toekenning	165
6.3. Optimale mix van energieopties door Peter Löhnberg	167
6.3.1. Probleemstelling	167
6.3.2 Opties	167
6.3.3 Randvoorwaarden voor gezamenlijke bijdragen	168
6.3.4 Grenzen voor afzonderlijke bijdragen	169
6.3.5 Randvoorwaarden in 2010 nog niet bereikbaar	170
6.3.6 Aspecten van opties	170
6.3.7 Optimalisatie	170
6.3.8 Conclusie	172
6.3.A Aanhangsel voor controle en optimalisatie met andere gegevens	173
6.4 Implementatie in ontwikkelingslanden; voorbeeld China door Marc Beurskens ..	176
China: een groeiende reus	176
Rol van het Westen	181
7 Eindconclusies van de werkgroep	182
Inleiding	182
Methodologie	182
Energiebesparing (hoofdstuk 2)	184
Hernieuwbare energie (hoofdstuk 3)	184
Windenergie (hoofdstuk 3.1)	184
Zonnewarmte (hoofdstuk 3.2)	185
Zonne-elektriciteit (hoofdstuk 3.3)	185
Waterkracht (hoofdstuk 3.4)	186
Bio-energie (hoofdstuk 3.5)	186
Aardwarmte (hoofdstuk 3.6)	186
Waterstof (hoofdstuk 3.7)	187
Schoon fossiel (hoofdstuk 4.1)	187
Opslag van CO ₂ (hoofdstuk 4.2)	187
Kernsplijting (hoofdstuk 5.1)	188
Kernfusie (hoofdstuk 5.2)	188
Evaluerend... (hoofdstuk 6)	189
Conclusies en prioriteiten	190
Weglopen voor het probleem is geen optie	191
Personalialia van de leden van de werkgroep energie-opties 2003/2004	193

1 Energie opties voor 21e eeuw door Marc Beurskens

Inleiding

In April 2003 is de PvdA-projectgroep energieopties voor de 21e eeuw opgericht met als doel om een inhoudelijke discussie over de lange termijn energie-problematiek aan te wakkeren. De zorg van de initiatiefnemers van de projectgroep is dat er, zowel op nationale als internationale schaal, onvoldoende tijdige maatregelen worden genomen om klimaatverandering ten gevolge van broeikasgasemissie tegen te gaan. In combinatie met de wereldwijd toenemende vraag naar energie en de daardoor dreigende schaarste aan duurzame energiebronnen, zijn investeringsbeslissingen van nu bepalend voor de mate van duurzame voorzieningszekerheid in de toekomst.

In dit verslag zijn de mogelijkheden van de belangrijkste duurzame energieopties en andere CO₂-vrije of -arme energiebronnen gewogen, de voor- en nadelen op een rijtje te gezet en gezien welke rol elk van deze opties kan spelen in reductie van CO₂-uitstoot en de energievoorziening van de toekomst.

Deze problematiek moet gezien worden in verband met een aantal gedeeltelijk aan elkaar gerelateerde onderwerpen:

:

- **Energieverbruik:** De energievraag zal nog sterk verder **groeien**, vooral in ontwikkelingslanden.
- **Energie-armoede:** In vele gebieden heerst er een gebrek aan toegang tot energie. Deze energiearmoede belemmert vaak verdere ontwikkeling en bemoeilijkt ontsnapping aan economische armoede.
- **Voorzieningszekerheid:** De voorraden fossiele brandstoffen dreigen op te raken, en we worden meer en meer afhankelijk van olie uit het Midden - Oosten en gas uit Rusland.
- **Klimaatverandering:** De CO₂-emissies die vrijkomen bij de verbranding van fossiele brandstoffen dragen bij aan het opwarmen van de aarde.
-

De drie onderwerpen, energiearmoede, voorzieningszekerheid en klimaatverandering zullen in deze studie van een politieke, wetenschappelijke en technische kant worden benaderd met een sociaal-democratische invalshoek. Bij de voorzieningszekerheid gaat het er om dat energie een redelijke prijs behoudt en voor alle bevolkingsgroepen toegankelijk blijft. Bij het voorkomen of matigen van klimaatverandering gaat het er om dat niet alleen onze generatie, maar ook toekomstige generaties in Europa een goed, interessant en redelijk welvarend leven kunnen leiden. En bij de ontwikkelingslanden laten wij de zaak niet op zijn beloop, maar stimuleren dat ook daar voor de hele bevolking, en niet alleen de top laag, energie en grondstoffen beschikbaar zullen zijn.

Wij zullen in deze inleiding gebruik maken van economische modellen om projecties naar de toekomst te maken. Die modellen bevatten soms vooronderstellingen, die niet altijd overeen komen met de manier waarop sociaal-democraten de samenleving

willen inrichten. Zij kunnen echter wel de keuzes verhelderen waarvoor wij staan en zijn daarom nuttig in het gebruik.

Vanuit de sociaal democratische gedachten gang van eerlijk delen, internationale solidariteit en het streven naar een duurzame samenleving, zijn alle beschouwde energieopties getoetst. Dat is gebeurd aan de hand van gedetailleerde criteria/aandachtspunten die aan het einde van dit hoofdstuk worden toegelicht.

Een groeiende vraag naar energie

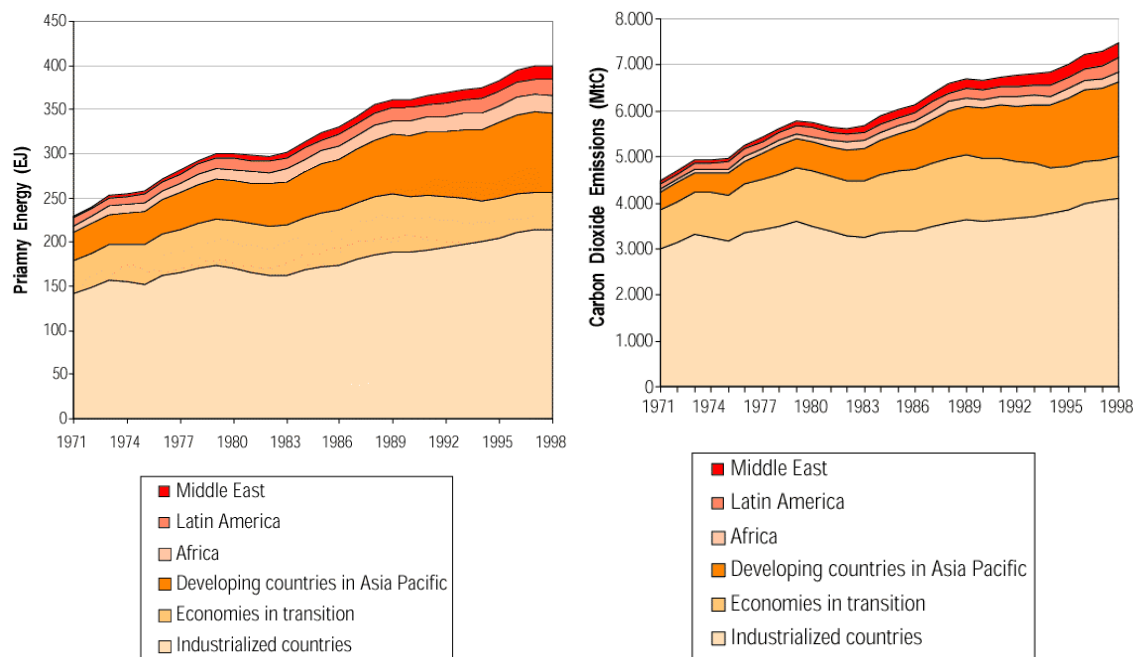
In Nederland staat de vraag naar een wereldwijde voorziening met duurzame energie, ook op de langere termijn, niet hoog op de politieke agenda. Liberalisering en privatisering overheersen de discussie over de voorzienings-zekerheid. Ons aardgas is de komende 25 jaar nog niet op, duurzame alternatieven voor fossiele brandstof komen slechts moeizaam van de grond en zo af toe steekt de gepolariseerde discussie over kernenergie weer de kop op. Wil Nederland zijn eigen energievoorziening ook voor de lange termijn veilig stellen en een actieve rol spelen in de Europese en internationale discussie, dan zullen we ons schuttersputje moeten verlaten.

De wereldenergieconsumptie is de afgelopen dertig jaar verdubbeld. In de geïndustrialiseerde landen is de het verbruik sinds 1970 met 50% gestegen. In zich ontwikkelende landen is de energievraag echter veel sneller gestegen. Vooral in Azië, en met name in India en China is de groei explosief geweest. De vraag naar energie steeg daar met 150% in dezelfde periode, zie figuur 1.1 (a).

In 1970 werd 75% van de primaire energie in de rijke landen geconsumeerd, terwijl daar maar 25% van de wereldbevolking leeft. Nu zijn deze landen nog maar verantwoordelijk voor 65% van het totale energieverbruik.

In gelijke tred met het energiegebruik zijn ook de emissies van koolstofdioxide, CO₂, gestegen (zie figuur 1.1 (b)). Deze emissies worden veroorzaakt door het verbranden van olie, kolen en gas (de zogenaamde fossiele brandstoffen.) Een groot nadeel van CO₂ is dat het in de atmosfeer dienst doet als broeikasgas en zo bijdraagt aan klimaatverandering. Het is zaak de concentratie CO₂ in de atmosfeer te minimaliseren om mogelijke dramatische klimaatverandering tegen te gaan.

De fossiele brandstoffen maken voor 80% deel uit van de totale energie-productie, zie tabel 1.1. Het zal duidelijk zijn dat een reductie van de uitstoot van CO₂ gepaard moet gaan met een sterke reductie van het gebruik van fossiele brandstoffen. Deze brandstoffen zijn echter zo flexibel in te zetten dat ze een centrale rol spelen in alle sectoren van het energieverbruik: elektriciteit, transport en warmte productie. Figuur 1.2 laat zien hoe deze sectoren deel uitmaken van het totale energieverbruik. Bij de elektriciteitsproductie maken fossiele brandstoffen wereldwijd gemiddeld 65% van de totale productie uit, bij warmte-productie is dat 85% en in de transportsector bijna 100%.



Figuur 1.1: (a) Het primaire wereld energieverbruik per gebied. (b) Wereld antropogene kooldioxide-emissies per gebied¹.

Geen enkele alternatieve energiebron kan in zijn geheel de rol van fossiele brandstoffen overnemen. Fossiele brandstoffen bieden een enorme flexibiliteit doordat ze zowel vast als vloeibaar en gasvormig voorkomen. Daardoor zijn ze zowel op grote als op veel toepassingen in de chemische industrie.

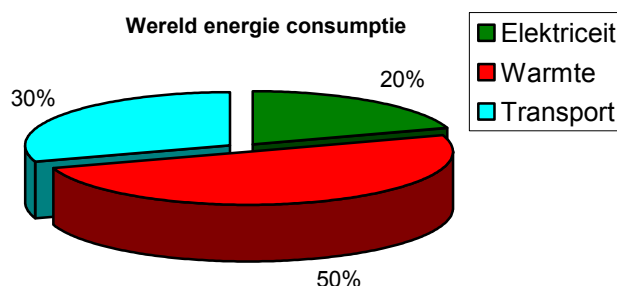
Voor elektriciteitsproductie kunnen bijvoorbeeld energie uit wind, waterkracht, fotovoltaïsche zonnecellen en splijting worden, maar deze zijn niet goed geschikt voor warmteproductie. Voor warmte kan men denken aan verbranding van biomassa, thermische zonnecollectors of geothermische bronnen. In de transportsector die nu volledig door olie wordt gedomineerd kan gedacht worden aan diesel uit biomassa, en aan alcohol of waterstof. Een toekomstige energiehuishouding zal dus moeten bestaan uit een zeer gevarieerde 'mix' van CO₂-vrije energiebronnen

De nieuw hernieuwbare bronnen (windenergie, zonne-energie, moderne biobrandstoffen en geothermische warmte) maken nu nog maar 0.6% uit van het totale mondiale energieverbruik. Het zal duidelijk zijn dat een grote inzet nodig is om deze bronnen uit te laten groeien tot een aanzienlijk aandeel in de energie-mix.

¹ IEA key world energy statistics, 2000

Bron	Aandeel in de energiemix
Olie	37.5%
Kolen	21.8%
Gas	21.1%
Waterkracht	6.6%
Kernenergie	6.0%
Traditionele biomassa	6.4%
Nieuw hernieuwbaar	0.6%

Tabel 1.1: aandeel van verschillende bronnen in de wereld energiemix voor het jaar 2000²



Figuur 1.2: indeling van het primaire energiegebruik per sector in 2000³

Toekomstig energie verbruik

In 2100 zal de wereld er heel anders uitzien dan nu. Een voorspelling maken van die toekomstige wereld is net zo moeilijk als het in 1900 was om een voorspelling voor het jaar 2000 te maken. Toch is het nuttig om te proberen een beeld te vormen van het toekomstige energie gebruik. De meest voor de hand liggende methode is net als bij het voorspellen van het weer ervan uit te gaan dat het morgen waarschijnlijk hetzelfde weer is als vandaag. Toegepast op toekomstig energieverbruik leidt deze aanpak tot een zogenaamd “business as usual” scenario. In zulk een scenario wordt er van uitgegaan dat de ontwikkeling van de wereldeconomie en wereldbevolking en daaraan gekoppeld het wereldenergieverbruik een gemiddelde groei vertonen. Zo zal ook de ontwikkeling van nieuwe schone technologie, en bijvoorbeeld energiezuinig gedrag zich slechts gemiddeld ontwikkelen.

Het IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) en het WEC (World Energy Council) hebben zo’n “business as usual scenario” ontwikkeld⁴. Volgens dit scenario zal de wereld bevolking de komende 100 jaar sterk groeien en zal de wereldeconomie zich sterk ontwikkelen. Deze groei in bevolking en economische activiteit heeft daarmee ook meteen een stijging in het energiegebruik tot gevolg⁵, zie figuur 1.3.

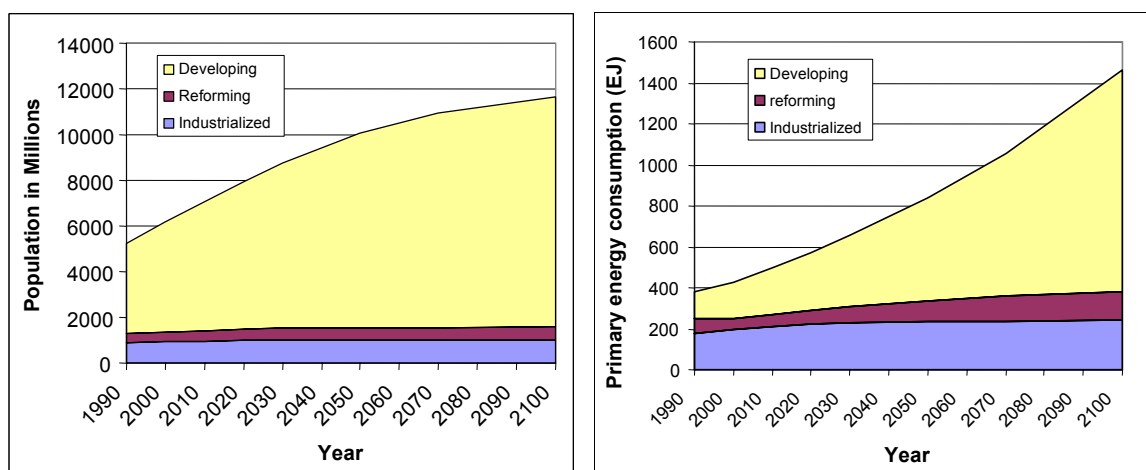
² IEA key world energy statistics, 2000

³ verschillende grafieken uit: IEA key world energy statistics, 2002

⁴ IIASA website: http://www.iiasa.ac.at/cgi-bin/ecs/book_dyn/bookcnt.py, B-scenario.

⁵ Het “business as usual” scenario volgt een gematigde groei in alle parameters. Er zijn ook scenarios geschreven voor een wereld met zeer sterke economische groei waarbij het energieverbruik nog veel

Vergeleken met figuur 1.1 zet de stijgende trend van het energiegebruik gestaag door. Was het de afgelopen dertig jaar al zo dat het energiegebruik in ontwikkelingslanden verhoudingsgewijze steeg, de komende 100 jaar zet deze trends zich volgens dit scenario door. In 2100 zal het aandeel van de geïndustrialiseerde wereld samen met de voormalige Sovjet Unie en Oost Europa nog maar 30% van het totale energieverbruik zijn. Om te demonstreren hoe hard de energievraag zal stijgen in de ontwikkelingslanden laat figuur 1.4 deze ontwikkeling per wereld gebied zien. Met name in Azië is deze groei explosief en zal de energievraag de komende 100 jaar volgens het “business as usual” scenario met maar liefst een factor 6 stijgen. Vergelijk dat met een groei in West Europa van minder dan 50%!

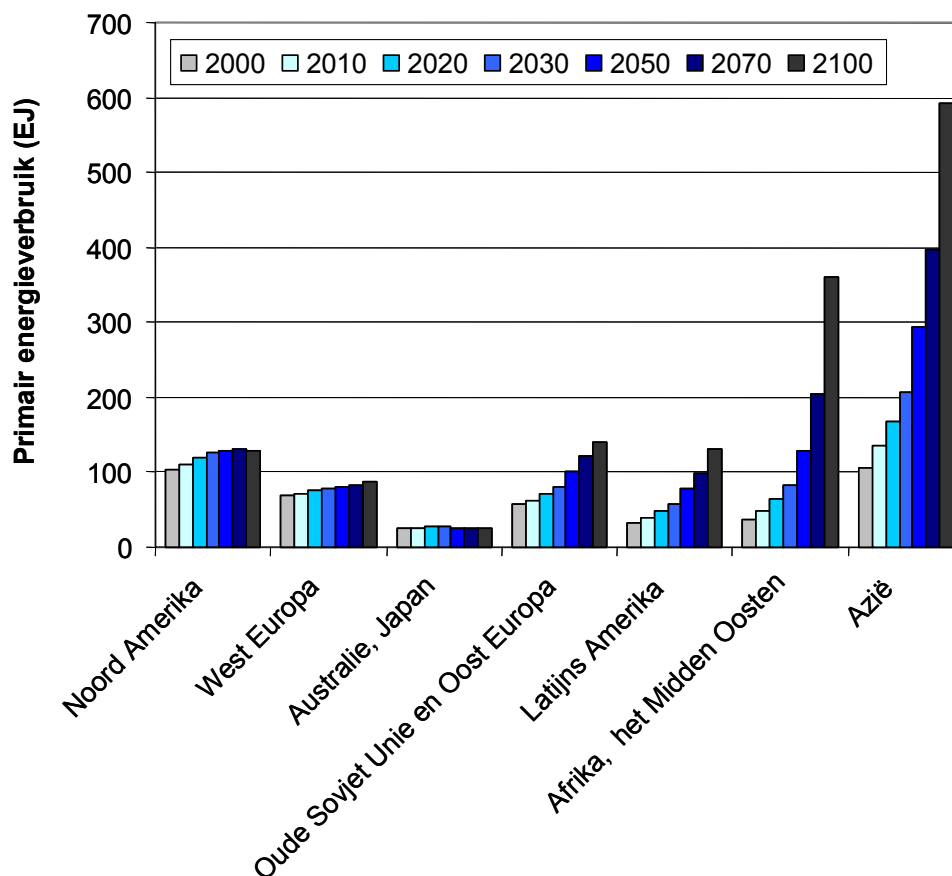


Figuur 1.3: (a) wereld bevolkingsgroei en (b) toename in primaire energieconsumptie per regio volgens het business as usual scenario van de IIASA en WEC. De regio's zijn: geïndustrialiseerde, reformerende (voormalige Sovjet Unie en Oost Europa) en ontwikkelingslanden⁶.

Is de energie aan het eind van deze eeuw dan eerlijker verdeeld? Gebruikt een Chinees net zoveel energie als een Europeaan in 2100? Volgens figuur 1.5 luidt het antwoord op deze vraag: nee. Wel zal de verdeling eerlijker zijn geworden maar aan het eind van deze eeuw verbruikt een gemiddeld persoon in India en China nog steeds slechts tweederde van wat een West Europeaan aan energie verbruikt en één derde van wat een Noord Amerikaan verbruikt.

hogere zou uitvallen. Tegelijkertijd zijn er ook scenario's waarbij het energieverbruik veel lager uitvalt dan in het hier gepresenteerde scenario. We kiezen voor dit “business as usual” scenario omdat het een pad aangeeft waarmee men tot een duurzame energiehuishouding kan komen.

⁶ Bron IIASA: http://www.iiasa.ac.at/cgi-bin/ecs/book_dyn/bookcnt.py, B-scenario



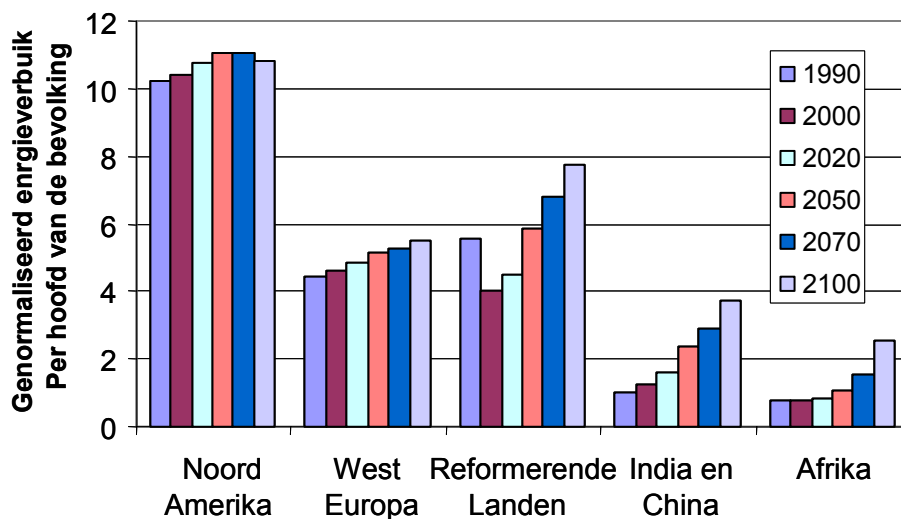
Figuur 1.4: toename van het energieverbruik tot 2100 in verschillende gebieden volgens het "Business as usual scenario". In de rijke landen zal het energieverbruik nauwelijks toenemen. De grote groei vindt echter plaats in de ontwikkelingslanden, met name in Azië⁷.

Energie en armoede.

Ondanks het zeer sterk groeiende aandeel in het energiegebruik, zal armoede en tekort aan moderne energiemiddelen in ontwikkelingslanden nog lang een groot probleem blijven. Het is bijna onnodig te zeggen hoe, in de internationale politieke context, explosief het mengsel van energieschaarste, armoede en het vraagstuk van een duurzame ontwikkeling is en kan gaan worden. Het Internationaal Energie Agentschap heeft in haar Wereld energie overzicht 2002⁸ een hoofdstuk gewijd aan de relatie tussen energieverbruik en armoede. Een figuur uit deze studie laat goed zien in welke gebieden toegang tot moderne energie een rol speelt. Deze figuur is getoond in figuur 1.6. Uit een combinatie van huidige feiten en toekomstprojecties volgens een "business as usual" scenario komt het agentschap tot de volgende conclusies:

⁷ Bron:IIASA, zie figuur 1.3

⁸ IEA, <http://www.worldenergyoutlook.org/pubs/weo2002/EnergyPoverty.pdf>



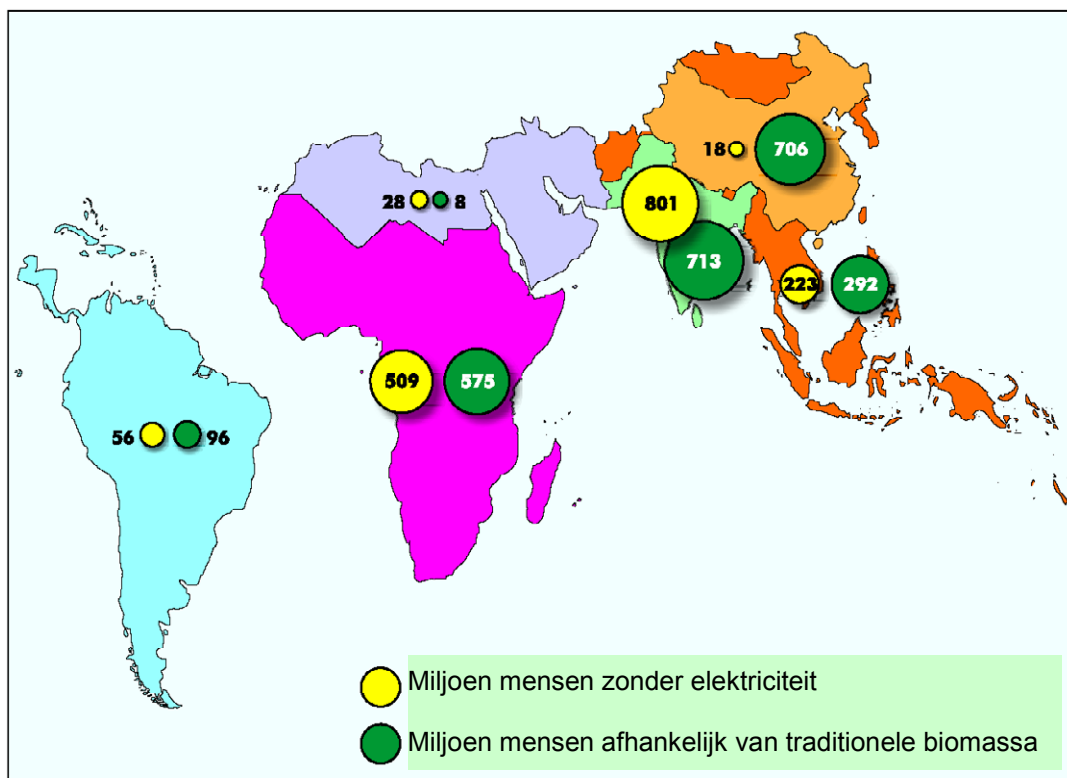
Figuur 1.5: Genormeerd energieverbruik per hoofd van de bevolking volgens het “business as usual scenario.” (Genormeerd wil zeggen dat het energieverbruik in 1990 van India en China per hoofd van de bevolking op 1 gesteld is)⁹

- Momenteel leven 1.6 miljard mensen, een kwart van de wereldbevolking, zonder toegang tot elektriciteit. Zonder rigoureuus nieuw beleid zullen dit er in 2030 nog steeds 1.4 miljard zijn.
- Vier op de vijf mensen zonder toegang tot elektriciteit wonen in rurale gebieden van ontwikkelingslanden, met name in Zuid Azië en sub-Sahara Afrika. Dit patroon van elektriciteitsgebrek zal echter veranderen omdat 95% van de groei in wereldbevolking zal plaatsvinden in stedelijke gebieden.
- Ongeveer 2.4 miljard mensen zijn afhankelijk van traditionele biomassa¹⁰ (hout, landbouw residuen en uitwerpselen) voor koken en verwarming. Dit aantal zal toenemen tot 2.6 miljard in 2030. In ontwikkelingslanden zal die biomassa in dat jaar nog steeds de helft van het huishoudelijke energiegebruik omvatten.
- Gebrek aan elektriciteit en afhankelijkheid van traditionele biomassa zijn sterke aanwijzingen van armoede in ontwikkelingslanden. Gebrek aan elektriciteit verergert de armoede en draagt bij tot het in stand houden daarvan, omdat het industriële activiteit weerhoudt en daarmee ook de daarmee gepaard gaande werkgelegenheid stagneert.
- Investerings moeten zich richten op verschillende energiebronnen, inclusief moderne biomassa, voor thermische en mechanische toepassingen om productieve en inkomensgenererende activiteiten naar ontwikkelingslanden te brengen.

⁹ Bron: IIASA, zie figuur 1.3

¹⁰ “Moderne biomassa”, zoals later geïntroduceerd, zorgt in tegenstelling tot “traditionele biomassa” voor een efficiënt gebruik van energie, en controleerbare emissies zodat lokale vervuilingen geminimaliseerd worden.

- Toegang tot moderne energie en elektriciteit zijn noodzakelijke voorwaarden voor reductie van armoede, maar hoeven dit niet perse tot gevolg te hebben.¹¹
- Hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-energie, windenergie en moderne biomassa kunnen kosteneffectieve opties zijn voor specifieke niet-netwerkgekoppelde elektriciteitssystemen, terwijl conventionele fossiele brandstoffen, zoals olie, gas en kolen, de voorkeur hebben bij een centrale elektriciteitsvoorziening. Dit laatste geldt vanwege de kosteneffectiviteit, de makkelijke toegang tot fossiele brandstof en de eenvoudige technologie van fossiele centrales.
- Omdat 95% van de bevolkingsgroei in stedelijke gebieden van ontwikkelingslanden zal plaatsvinden, zal de groei van centrale netwerkgekoppelde elektriciteitsvoorziening op basis van fossiele brandstoffen in ontwikkelingslanden een sterke groei ondervinden.



Figuur 1.6: energiearmoede in ontwikkelingslanden uitgedrukt in toegang tot elektriciteit en afhankelijkheid van biomassa¹².

Belangrijk voor het vervolg van dit hoofdstuk is dat de vraag naar fossiele brandstoffen zeer sterk zal gaan groeien in de ontwikkelingslanden. Deze landen zullen zich daarom sterk gaan richten op een energievoorziening, die is

¹¹ Hiermee wordt bedoeld dat toegang tot moderne energie nodig is, maar dat andere factoren, zoals bijvoorbeeld open markten, ook een belangrijke rol spelen.

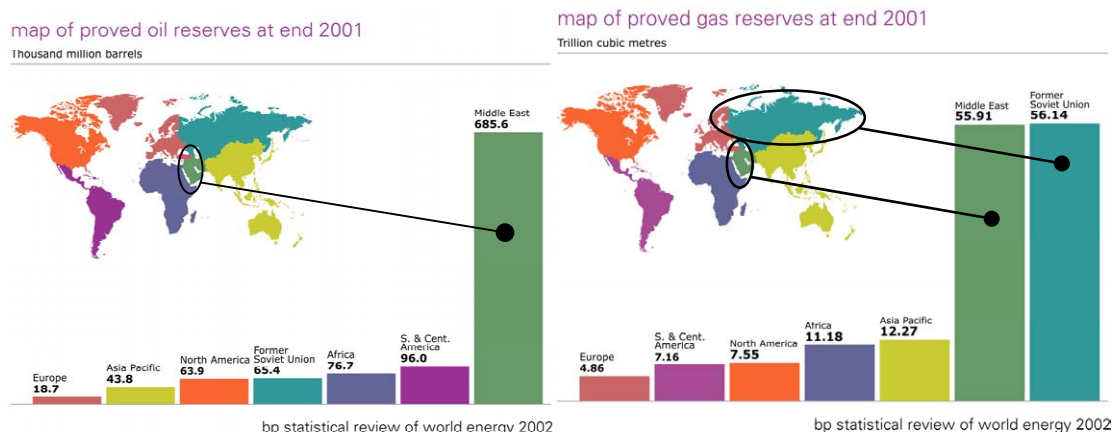
¹² IEA, WEO 2002 energy and poverty chapter

gebaseerd op fossiele brandstoffen. Dit heeft zowel gevolgen voor de voorzieningszekerheid en leveringszekerheid van deze brandstoffen voor de rest van de wereld (de geïndustrialiseerde landen) als voor het dreigende klimaatprobleem. Deze onderwerpen worden besproken in de volgende twee paragrafen.

Voorzieningszekerheid van fossiele brandstoffen

Fossiele brandstoffen zoals olie, kolen en gas zijn een ideale bron van energie. Ze kunnen relatief gemakkelijk uit de grond gehaald worden, zijn inzetbaar op elk moment en kunnen zowel op zeer kleine schaal (zoals in een aansteker) als op zeer grote schaal (zoals in een grote kolenelektriciteitscentrale) toegepast worden. Alle andere niet-fossiele opties hebben hun eigen specifieke nadelen en geen enkele van deze opties kan de rol van fossiele brandstoffen volledig overnemen. Waarom zijn we dan nog op zoek naar andere manieren van energieopwekking?

Eén groot nadeel van fossiele brandstoffen is dat ze slechts op zeer gelocaliseerde gebieden voorkomen. Vooral de olie- en gasvoorziening kampen met dat probleem. Figuur 1.7 laat zien dat 70% van alle olievoorraden in het Midden Oosten te vinden zijn en dat gasvoorraden voor 70% te vinden zijn in het Midden Oosten en in Rusland. Deze ongelijke verdeling van voorraden kan,



Figuur 1.7: (a) 70 % van de olie voorraden zijn te vinden in het Midden Oosten. (b) Gas voorraden zijn vooral te vinden in Rusland en het Midden Oosten waar 70% van de voorraden zijn¹³.

zoals bekend, leiden tot politieke en economische spanningen. Deze asymmetrie wordt nog eens versterkt door het feit dat de consumptie van olie en gas vooral plaats vindt in die gebieden waar niet veel voorraden (meer) zijn. Dit wordt weergegeven in figuur 1.8. Voor kolen is de situatie meer gebalanceerd.

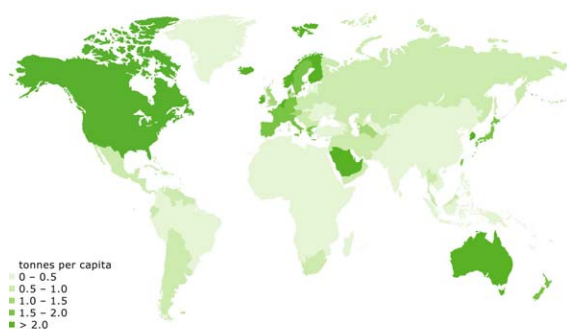
¹³ BP statistical review 2002

Kolenvoorraden zijn zeer wijd verspreid en bovendien zijn de voorraden veel groter dan die van olie en gas.

De Europese unie is momenteel voor 50% van haar fossiel brandstoffenverbruik afhankelijk van import. De Europese unie verwacht dat dit aandeel in 2030 tot 70% zal stijgen. Voor olie zal dit in 2030 zelfs stijgen tot 90%.

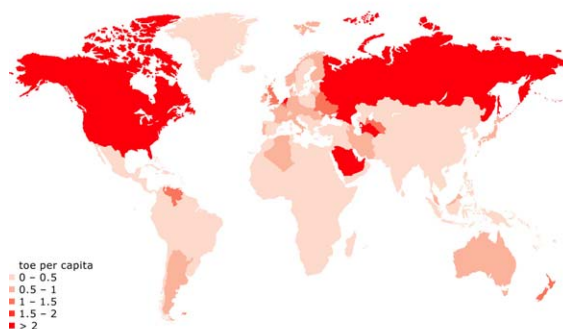
Deze afhankelijkheid is een belangrijke reden voor Europese landen om op zoek te gaan naar alternatieven voor olie en gas voor haar toekomstige energie-voorziening. Een alternatief kan geboden worden door kolen omdat daar nog veel van is en omdat er binnen Europa, en zeker binnen het nieuwe Europa van 25 landen, nog voldoende kolenvoorraden aanwezig zijn.

map of oil consumption per capita
Tonnes



bp statistical review of world energy 2002

map of natural gas consumption per capita
Tonnes oil equivalent



bp statistical review of world energy 2002

Figuur 1.8: Olie en gas consumptie per hoofd van de bevolking in verschillende mondiale gebieden¹⁴. Het grootste gebruik van olie en gas vindt plaats in gebieden waar voorraden slinken.

Fossiele brandstoffen; reserves en voorraden.

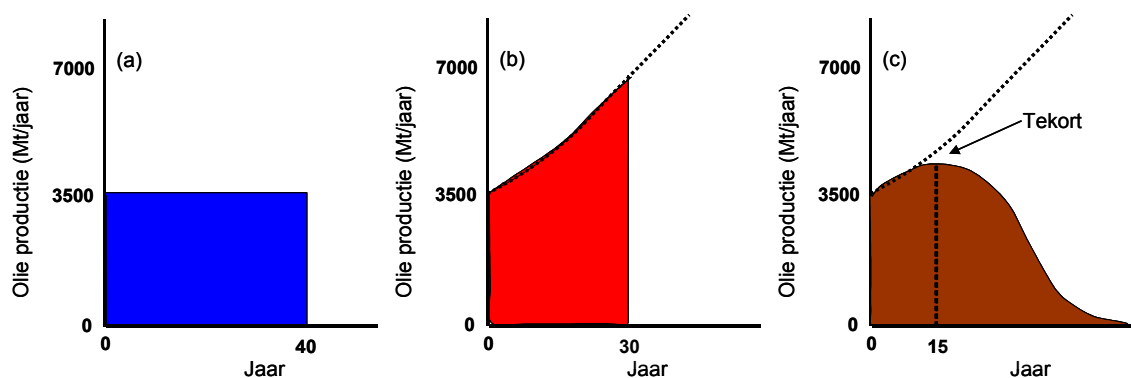
Volgens een statistisch overzicht¹⁵ van British Petroleum (BP) zijn er nog voldoende reserves aan olie, gas en kolen om tegen het huidige productieniveau nog voor 41 jaar (olie), 62 jaar (gas) en 220 jaar (kolen) vooruit te kunnen. Dit betreft commercieel winbare reserves die tegen de huidige marktprijs en technologische kennis te winnen zijn. Het energieverbruik zal de komende decennia echter flink stijgen, waardoor de voorraden al veel eerder op kunnen raken. Om dit te illustreren geeft figuur 1.9 een schets van wat er met de voorraden en productie gebeurt als de energie vraag groeit. Er zou al over 15 jaar een tekort aan olie kunnen ontstaan.

Staat ons een doemscenario te wachten waarbij er vele oorlogen gestreden zullen worden om het laatste restje olie? Hopelijk niet, en het is ook niet erg waarschijnlijk.

¹⁴ BP statistical review 2002, www.BP.com

¹⁵ BP statistical review 2002, www.BP.com

Er zijn nog grote hoeveelheden olie te vinden in zogenaamde teerzanden, met name in Canada. Deze zouden de totale olievoorraad verdubbelen. Daarnaast zijn er ook nog grote hoeveelheden gas in de vorm van methaan te vinden in zogenaamde gas hydraten in diepe oceaan bedden. Momenteel zijn er geen technologieën beschikbaar om dit gas economisch en veilig te winnen, maar er wordt veel onderzoek naar gedaan. En mocht het uiteindelijk niet lukken met olie en gas dan lijken de voorraden kolen ons vooralsnog van voldoende energie te voorzien om de groeiende energievraag deze eeuw aan te kunnen.



Figuur 1.9: (a) De huidige olie reserves zouden nog voor zo'n 40 jaar meekunnen als het huidige productieniveau van 3500 Mt/jaar in stand gehouden wordt. (b) Als de productie echter een groeiende energievraag blijft volgen zullen de reserves al 10 jaar eerder op raken. (c) Er zijn nu echter al aanwijzingen dat de productiecapaciteit zal stagneren en de vraag niet meer kan volgen waardoor er al veel eerder een tekort zou ontstaan ontstaat.

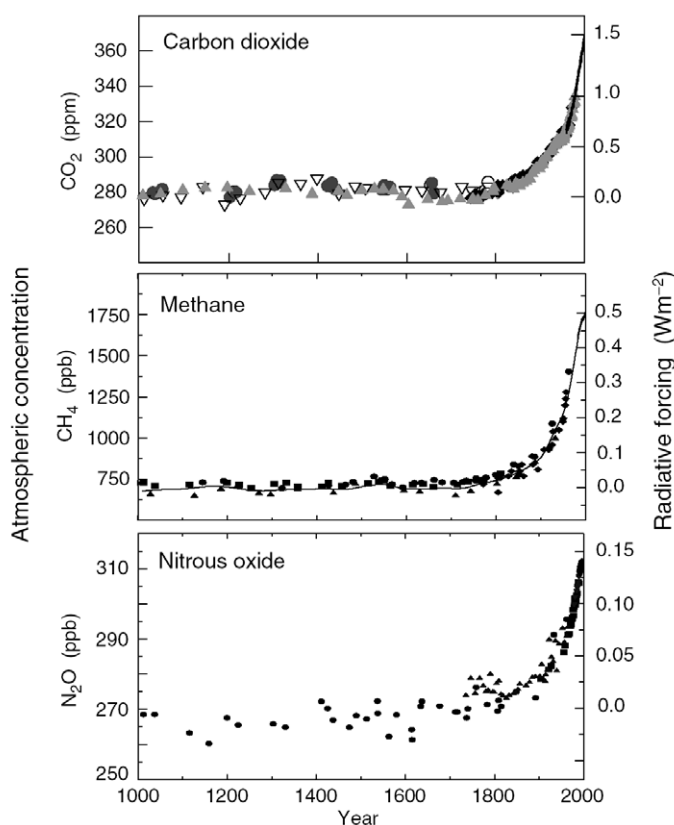
Klimaat verandering en broeikasgasemissies

Uit bovenstaande analyse zou men kunnen concluderen dat kolen de uitkomst bieden voor de problemen van energiearmoede en voorzieningszekerheid. Ontwikkelingslanden hebben in stedelijke gebieden behoefte aan goedkope fossiele energie. Kolen zijn goedkoop, de technologie is eenvoudig en ze zijn wijd verspreid verkrijgbaar. Er zit helaas één groot nadeel aan. Het verstoken van kolen is dé hoofdoorzaak van vervuiling in stedelijke ontwikkelingsgebieden, in met name China en India. De smogvorming en effecten van zure regen zijn in die gebieden nu al onacceptabel. Wil men kolen blijven toepassen dan zal men op schonere, en duurere, technologie moeten overstappen.

Een bijkomend probleem van mondiale schaal is dat kolen per geproduceerde hoeveelheid energie meer van het broeikasgas CO₂ uitstoten dan gas en olie¹⁶. Broeikasgassen zijn gassen die bijdragen aan het opwarmen van de aarde. Ze zorgen boven in de atmosfeer voor een isolerend laagje dat straling van de zon op de aarde gewoon doorlaat, maar dat de straling die terugkomt van de aarde tegenhoudt zodat er effectief meer warmte vastgehouden wordt. Een bepaalde

¹⁶ Het gemiddelde in Europa ligt nu per geproduceerde GJ energie op 56 kg voor gas, 75 kg voor olie, en 94 kg voor kolen: Ralph E. H. Sims et al, Energy Policy 31 (2003) 1315-1326; verkorte versie van IPCC 2001, Mitigation, pp 235 ff

hoeveelheid broeikasgassen is nodig omdat anders de gemiddelde temperatuur op aarde onder het vriespunt zou dalen. Maar een stijgende hoeveelheid zou de temperatuur doen toenemen. De afgelopen duizend jaar tot het begin van de industriële revolutie is de concentratie van CO₂ in de atmosfeer constant gebleven op zo'n 280 deeltjes per miljoen deeltjes lucht. Deze hoeveelheid wordt uitgedrukt in ppm, wat 'particles per million' betekent. Gedurende de laatste 100 jaar is de concentratie CO₂ echter sterk opgelopen door een toegenomen gebruik van fossiele brandstoffen. Deze toename is begonnen aan het begin van de industriële revolutie en is sindsdien gestaag doorgegaan. Momenteel is de concentratie CO₂ 360 ppm, en het lijkt erop dat de stijging gewoon doorgaat.



Figuur 1.10: Broeikasgas concentraties voor de afgelopen 1000 jaar voor CO₂, methaan en N₂O. De concentraties zijn lange tijd constant gebleven en pas na het begin van de industriële revolutie gaan stijgen, tegelijkertijd met de toename van het gebruik van fossiel brandstoffen zoals kolen, olie en gas. Linker as: concentratie in ppm of pbm (particles per milion or billion) Rechter as: Het broeikaseffect (Watt/m²)¹⁷.

Figuur 1.10 laat zien hoe de concentratie van CO₂ in de atmosfeer de afgelopen 100 jaar gestegen is van 280 tot 360 ppm. Naast CO₂ zijn er nog andere door de mens

¹⁷ IPCC Climate change 2001: the Scientific Basis, summary for policy makers, figure 2, (<http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>)

uitgestoten broeikasgassen zoals methaan en N_2O .¹⁸ Zoals figuur 1.3 en 1.4 laten zien zal het energieverbruik de komend 100 jaar nog flink stijgen. Deze energievraag zal voor een groot gedeelte met fossiele brandstoffen ingevuld worden. Dat betekent dat de CO_2 -uitstoot ook zal blijven toenemen. De vraag is hoeveel de concentratie broeikasgassen kan stijgen zonder dat onacceptabele klimaatverandering plaats vindt.

Wat is het effect van een oplopende concentratie CO_2 op het klimaat? Het is een wetenschappelijk feit dat CO_2 in de atmosfeer een isolerende werking heeft, maar wat precies de invloed van CO_2 is op bijvoorbeeld de temperatuurstijging is afhankelijk van vele factoren. Het Intergouvernementele Panel voor Klimaat-Verandering (IPCC) heeft een uitgebreide studie gedaan naar de invloed van broeikasgassen op het klimaat zoals berekend met een verscheidenheid aan klimaatmodellen¹⁹. Deze modellen hebben gekeken naar de invloed van verschillende concentraties CO_2 in de atmosfeer en hebben daarvoor een aantal energiescenario's meegenomen, variërend van sterk groeiend energiegebruik tot een zeer matige stijging van consumptie. Figuur 1.11 geeft een schematische weergave van de resultaten van de IPCC studie. De belangrijkste conclusies van de studie zijn:

- Voor het totale bereik aan energiescenario's is er aan het eind van deze eeuw een temperatuurstijging voorzien van 1.8 tot 5.8 °C.
- De minimaal voorziene toename in CO_2 -concentratie zal leiden tot een concentratie van 550 ppm aan het eind van deze eeuw. Deze concentratie zal waarschijnlijk leiden tot een temperatuurstijging van 1.8 tot 3 °C over de komende 100 jaar.
- De voorziene temperatuurstijging is veel sneller dan zich heeft voorgedaan gedurende de laatste 10.000 jaar.
- Voor het volledige bereik van figuur 1.11 wordt voorzien dat de zeespiegel zal stijgen met 0.09 tot 0.88 meter tussen 1990 en 2100.
- Extremen zoals overvloedige regen en droogte zullen vaker voorkomen.
- Over het algemeen zal de biodiversiteit op aarde afnemen.

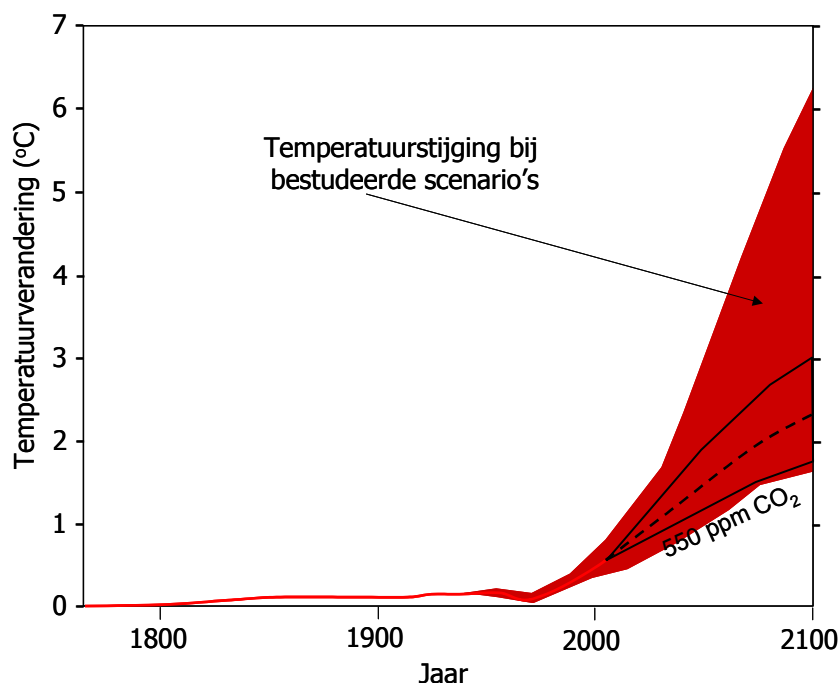
Nu ligt de CO_2 -concentratie op 360 ppm en het lijkt onhaalbaar daarop te stabiliseren²⁰. Dit zou immers een wereldwijde abrupte transitie naar een volledig CO_2 -vrije energie voorziening betekenen, terwijl er nu nog veelvuldig gebruik gemaakt wordt van fossiele brandstoffen. Een uiteindelijke stabilisatie van de CO_2 concentratie op 550 ppm wordt door klimatologen als een praktisch haalbaar en

¹⁸ De concentratie van deze twee zijn veel lager dan die van CO_2 , maar het zijn ook veel sterkere broeikasgassen. Methaan is 25 maal sterker en N_2O zelfs 200 maal sterker. Vanwege de lage concentraties van methaan en N_2O liggen de verhouding in invloed op broeikas effect van CO_2 , methaan en N_2O als 70%, 23%, en 7%, waarmee CO_2 het belangrijkste broeikasgas is.

¹⁹ IPCC "Climate Change 2001 (The Scientific Basis)"

²⁰ Stabiliseren van de concentratie CO_2 in de atmosfeer wil zeggen dat deze concentratie behouden blijft in de tijd. Dit betekent dat er een natuurlijk evenwicht is ontstaan tussen natuurlijke en menselijke emissies enerzijds en absorptie van CO_2 door natuurlijke processen anderzijds.

tegelijktijd nog acceptabel doel gezien. Dit doel is een compromis tussen nog enige initiële emissietoename en geminimaliseerde milieueffecten. De Europese unie heeft zich samen met vele andere instanties tot doel gesteld dat de CO₂-concentratie de komende eeuw niet boven deze 550 ppm uit mag komen.



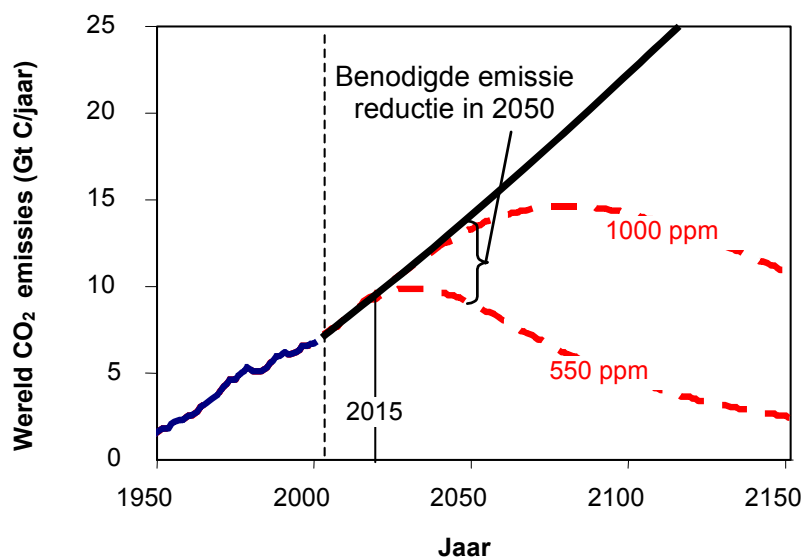
Figuur 1.11: Temperatuursverandering gedurende de laatste 230 jaar en geprojecteerd naar de toekomst zoals berekend met de IPCC klimaat modellen. tot nu toe is de temperatuur al met 0.5 °C gestegen. Het “550 ppm” regime ligt helemaal onderaan in het bereik van door het IPCC verwachte temperatuursverandering. Het is dus zaak om de CO₂ concentratie op dit niveau te stabiliseren²¹.

Welk deel van de toekomstige energie voorziening moet daarvoor CO₂-vrij worden? Dit hangt uiteraard sterk af van het uiteindelijke energiegebruik. Figuur 1.12 vergelijkt de CO₂-uitstoot voor het “business as usual” scenario van figuur 1.3 met emissies per jaar waarmee men uiteindelijk op 550 en 1000 ppm uit komt. Het is duidelijk dat er in het “business as usual” scenario te veel CO₂ uitgestoten zou worden. Overduidelijk is dat de doelstelling van de EU van 550 ppm alleen gehaald kan worden als de huidige groei in gebruik van fossiele brandstoffen al voor 2015 afgeremd wordt.

Weinig opmerkelijk is dat de belangrijkste groei in wereldenergie gebruik niet in de rijke landen zal plaatsvinden. De groei zal vooral plaatsvinden in de zich snel ontwikkelende landen als India en China, maar ook in Zuid Amerika en Afrika (figuur 1.4). Voor deze landen staat economische ontwikkeling en dus ontsnappen aan

²¹ IPCC climate change2001, Scientific Base, technical summary figure 22. (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/slides/05.02.htm)

armoede voorop. Uit oogpunt van solidariteit kunnen we van deze landen niet verwachten dat ze in eerste instantie hun groeiende vraag naar energie en daarmee hun economische ontwikkeling gaan afremmen. De verantwoordelijkheid ligt daarom bij de industrielanden die dankzij hun ongeremde groei in het verleden, nu het vermogen hebben opgebouwd om hun energiegebruik te ontkoppelen van economische groei.



Figuur 1.12: Uitstoot van CO₂ door menselijke activiteit gedurende de laatste 50 jaar en een projectie naar de toekomst voor het business as usual scenario uit figuur 1.3 (doorgetrokken lijn). De andere twee curven met de indexering 550 ppm en 1000 ppm geven de CO₂-emissies per jaar aan, waarmee uiteindelijk op deze concentraties wordt gestabiliseerd.²²

Wereldwijd moet de uitstoot van CO₂ ten opzichte van het “business as usual” scenario in 2050 met 50% gereduceerd worden en in 2100 met zo’n 90% (Figuur 1.12). Europa heeft zich echter strengere doelen gesteld. In 2050 wil zij een emissiereductie bewerkstelligen van 50% ten opzichte van 1990, dat is een reductie van 75% ten opzichte van het business as usual scenario.

Evaluatie

Uit het voorgaande kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het mondiale energieverbruik zal de komende 100 jaar een factor 4 stijgen. Die stijging zal vooral plaats vinden in ontwikkelingslanden zoals India en China waar het verbruik met maar liefst 600% zal stijgen, terwijl die stijging in geïndustrialiseerde landen “slechts” 50% zal zijn.
- Er zijn voldoende fossiele brandstoffen om in deze stijgende energie behoefte te voorzien gedurende de komende 100 jaar.

²² Business as usual scenario: IIASA, zie figuur 1.3, Emissie curves voor 550 en 1000 ppm: Wigley, T. M. L., R. Richels and J. A. Edmonds, (1996) Alternative emissions pathways for stabilizing CO₂ concentrations, Nature, 379, 240-243.

- De sterke lokalisatie van met name olie- en gasvoorraden kan leiden tot politieke en economische spanningen. Steenkool kan op veel plaatsen in grote hoeveelheden gevonden worden en zou daarom een belangrijke rol kunnen spelen om voorzieningszekerheid te verbeteren.
- Het opbranden van alle voorraden fossiele brandstoffen, zonder maatregelen om de CO₂ uitstoot af te vangen, zal leiden tot onacceptabele klimaatverandering.
- Steenkool stoot per hoeveelheid gegenereerde energie 2 maal zo veel CO₂ uit als gas en 1.5 keer zoveel als olie.
- Wereldwijd moet de uitstoot van CO₂ ten opzichte van het “business as usual” scenario in 2050 met 50% gereduceerd worden en in 2100 met zo’n 90%.
- Aangezien ontwikkelingslanden zich vooral zullen richten op economische ontwikkeling zal de eerste reductie van broeikasgassen plaats moeten vinden in de geïndustrialiseerde landen. Europa stelt zich daarom als doel om reducties van CO₂-emissie te bewerkstelligen van 50% in 2050 t.o.v. 1990. Andere geïndustrialiseerde landen zouden dit voorbeeld moeten volgen.
- In ontwikkelingslanden zal men echter ook tijdig moeten beginnen met emissiereductie van CO₂, omdat zij na 2030 al meer dan 50% van de primaire energie zullen gebruiken.

Op weg naar een duurzame energie huishouding

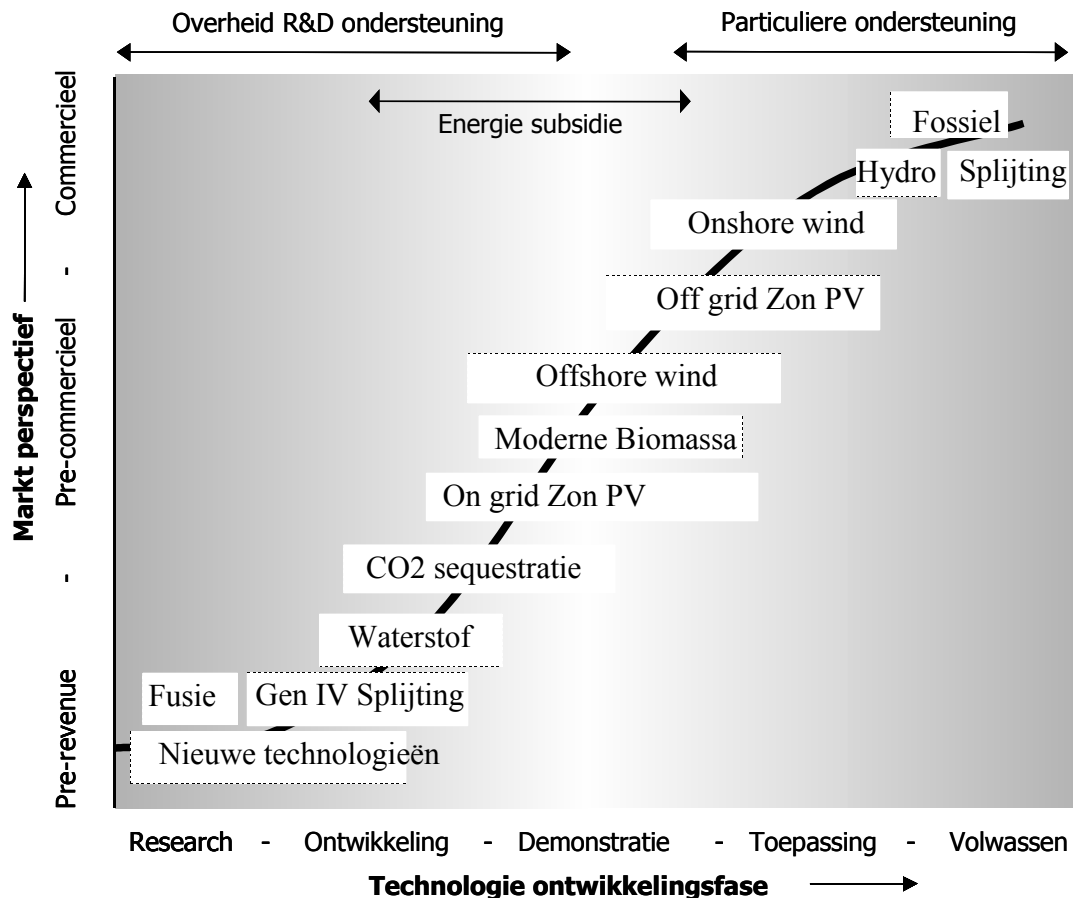
Op welke manieren kunnen emissies van broeikasgassen worden gereduceerd? In dit rapport zullen de belangrijkste opties de revue passeren in de volgorde:

1. Energiebesparing (hoofdstuk 2)
2. Hernieuwbare energie bronnen (hoofdstuk 3)
3. Schoon fossiel, inclusief CO₂ afvang en opslag (hoofdstuk 4)
4. Kernenergie met aparte discussie van kernsplijting en kernfusie (hoofdstuk 5).

Elke optie wordt objectief besproken en beoordeeld. Per energieoptie zullen voorzieningszekerheid en klimaat- en andere milieu-effecten besproken worden. Daarnaast wordt aangegeven wat de bijdrage van de optie kan zijn met betrekking tot reductie van energie armoede in ontwikkelingslanden. Er wordt gepoogd om per optie aan te geven hoeveel en wanneer de optie in de EU-15 bij kan dragen aan een duurzame energiehuishouding.

Bij deze analyse moet rekening gehouden worden met de ontwikkelingsfase waarin de besproken technologie zich bevindt. Figuur 1.13 geeft een aantal van de besproken technologieën aan in een curve van technologie ontwikkeling versus marktperspectief. Deze zogenaamde S-curve van ontwikkeling geeft aan waar bestaande en nog te ontwikkelen technologieën staan ten opzichte van elkaar in toepasbaarheid en concurrentie positie. Een aantal van de technologieën zijn al volledig volwassen en concurrerend zoals fossiele-brandstoftechnologie, waterkracht- en kernsplijtingstechnologie. Andere

technologieën worden weergegeven als toepasbaar en bijna marktconform zoals windenergie op land en zon-PV in rurale gebieden.



Figuur 1.13 Ontwikkelingscurve van energietechnologieën²³

Helemaal onder aan de curve staan nog volledig te ontwikkelen energiebronnen en -dragers zoals kernfusie, Generatie IV kernsplitsingcentrales, waterstof als energieopslag medium en CO₂-opslag. Een laatste groep zit in de ontwikkelings en/of demonstratiefase zoals netgekoppelde zon-PV, biomassatechnologieën en wind op zee.

De curve van figuur 1.13 is erg schematisch. Het is moeilijk om de verschillende opties tweedimensionaal uit te zetten op technologieontwikkeling en marktconformiteit. Hoe kan men immers de kostprijs van een PV-module vergelijken met het grote grondoppervlak dat nodig is om biomassa energie te produceren? Ondanks deze tekortkomingen geeft de vergelijking een instrument in handen om aan te geven wat voor ondersteuning verschillende

²³ Naar: "Renewable energy in the future" Presentation to EU-EXTOOL/IEA-EXCETP workshop, 22/23 January 2003 Robert A. Kleiburg Vice President Strategy and Planning Shell Renewables. De figuur is door de auteur aangevuld met niet-hernieuwbare energiebronnen.

opties nodig hebben. Zo lijkt het erop dat windenergie-op-land al bijna een volwassen technologie is waarbij particuliere investeringen volstaan. Beperkte subsidie is misschien nog nodig om de technologie op de markt een zetje te geven. Netgekoppelde zonne-energie daarentegen kan nog niet concurreren met bestaande energiebronnen, en behoeft nog ondersteuning in de vorm van onderzoeksgelden en subsidie. Een ander voorbeeld wordt gegeven door kernfusie. Deze technologie bevindt zich nog volledig in de onderzoeksfase en kan dus alleen ontwikkeld worden met overheidsondersteuning voor R&D.

Een duurzame toekomst; verantwoordelijkheid van het Westen?

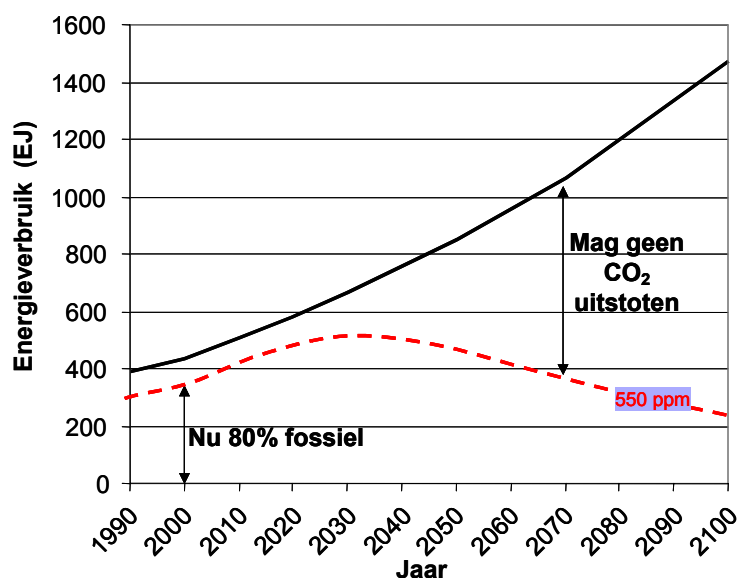
Wie is er verantwoordelijk voor de ontwikkeling van nieuwe schone energieopties voor de toekomst? In dit rapport gaan wordt vooral gekeken naar opties voor de EU-15 landen. We zijn ons zeer wel bewust dat de Europese unie sinds 1 mei 2004 uitgebreid is tot 25 lidstaten, en dat de energie problematiek daar net zo hard geldt als voor de EU-15. Voor deze studie is toch gekozen voor de EU-15 landen omdat in internationale databanken overvloedige informatie te vinden is voor deze landen. In het synthese hoofdstuk 6 van dit rapport wordt ingeschat of er voldoende hernieuwbare bronnen beschikbaar zijn om in de EU-15 te voldoen aan 50% CO₂-emissie reductie in 2050 en zelfs aan 90% emissiereductie in 2100.

De energieproblematiek strekt verder dan de EU-15, maar gaat ook ver aan de grenzen van de EU-25 voorbij. Zoals figuur 1.3 laat zien stijgt de energievraag deze eeuw in de industrielanden met zo'n 50% terwijl in sommige ontwikkelingslanden deze met 600% zal toenemen. Momenteel gebruikt het rijke "Westen" nog zo'n 65 % uit van dewereld energie, terwijl het aan het eind van deze eeuw het Westen nog maar 30% van het verbruik voor zijn rekening zal nemen. Dit geeft de beperking aan van de mogelijke bijdrage van het Westen. Onderstaande grafieken 1.14 (a) tot en met (c) geven de de problematiek nogmaals op wereldschaal. Figuur 1.14 (a) laat zien hoe de energievraag stijgt volgens het "business as usual" scenario. In dezelfde grafiek is aangegeven welk deel van de energievraag nog met fossiel brandstoffen mag worden voorzien zonder opslag van CO₂²⁴. Als deze curve gevolgd zou worden dan zou de CO₂ concentratie uiteindelijk stabiliseren op 550 ppm. Het gat tussen de 550-ppm-emissies en de energievraag wordt groter en groter in de loop van de eeuw.

Figuur 1.14 (b) laat zien dat als alle rijke landen (Europa, Noord-Amerika, Japan, Australië, Voormalige Sovjet unie etc.) 50% emissie reductie bewerkstelligen in 2050 en 100% in 2100, er nog steeds een groot gat ontstaat tussen geprojecteerde emissie en 'geoorloofde' emissie. Pas als de ontwikkelingslanden mee gaan doen kan de doelstelling van stabilisatie op 550 ppm gehaald worden. Figuur 1.14 (c) laat zien dat als reducties in ontwikkelingslanden van 50 % pas plaats vinden aan het eind van deze eeuw dat niet voldoende is om de CO₂-emissie doelstelling te halen. Al vanaf 2030 is er een inspanning van de ontwikkelingslanden nodig.

²⁴ In deze analyse wordt ervan uitgegaan dat de emissiefactoren van fossiel brandstoffen gelijk zullen blijven deze eeuw. Dit is niet helemaal juist, daar nieuw te ontwikkelen technologieën de efficiëntie zullen verbeteren.

Het mag voorop gesteld worden dat de initiële verantwoordelijkheid ligt bij de rijke landen. Als dezen niet het goede voorbeeld geven, dan zullen de ontwikkelingslanden zeker niet volgen. Emissiereductie van broeikasgassen en schone technologie zullen dus in het Westen moeten starten.



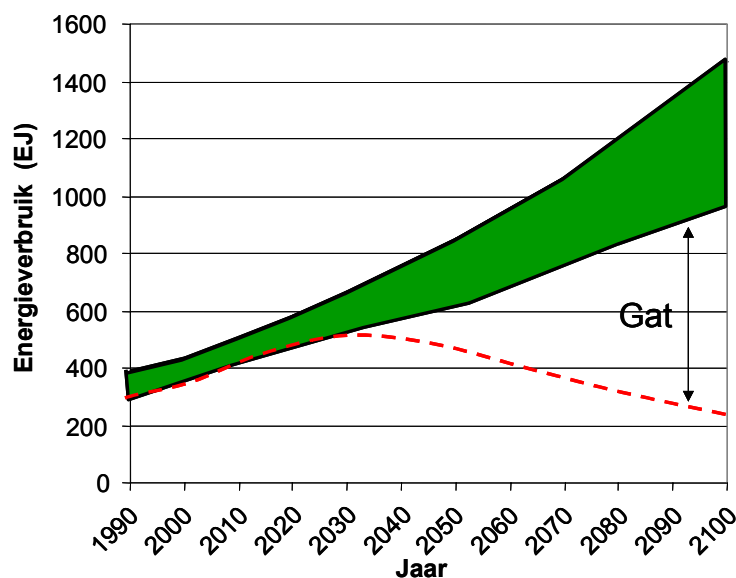
Figuur 1.14 (a) De energievraag stijgt volgens een "business as usual scenario" van figuur 1.3. Het budget van fossiel brandstoffen wordt aangegeven met de stippellijn. Als deze stippellijn gevolgd wordt dan stabiliseert de concentratie CO_2 op 550 ppm.²⁵

Toetsingscriteria energie opties

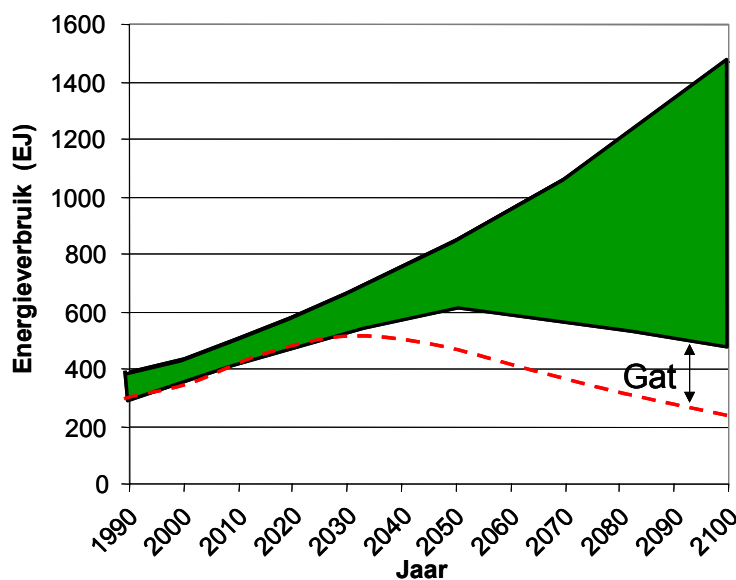
In deze paragraaf worden de gebruikte toetsingscriteria uit de doeken gedaan die toegepast zijn op de energieopties in dit rapport. De bedoeling van deze criteria is om de energieopties te voorzien van een Consumentenbond indicatie, en zo mogelijk te komen tot een advies ten aanzien van

- een aanvaardbare 'mix'
- Onderzoek en Ontwikkeling (O&O of R&D), welke optie overheidssteun op nationaal en Europees niveau verdient
- eventuele andere door de overheden te nemen maatregelen.

²⁵ Business as usual scenario: IIASA, zie figuur 1.3, Emissie curves voor 550: Wigley, T. M. L., figuur 1.12. In deze grafiek is de 550 ppm emissie curve vertaald naar energieverbruik door het gegeven te gebruiken dat 80% van het huidige energieverbruik geschiedt met fossiele brandstoffen. Voor de toekomst zijn brandstofmix en emissiefactoren constant gehouden.



Figuur 1.14 (b): indien de industrielanden in 2050 voor 50% minder CO₂ uitstoten dan in 1990 en in 2100 helemaal niet meer, treedt er nog steeds een groot gat op in benodigde CO₂-vrije energie.²⁶



Figuur 1.14 (c): naast de industrielanden moeten de ontwikkelingslanden ook mee gaan doen in CO₂ emissie reductie. In de figuur is aangenomen dat de ontwikkelingslanden in 2050 nog geen reductie hebben bewerkstelligd en pas in 2100 50% van hun energie CO₂-vrij hebben gemaakt. Onder deze aanname lijkt het erop dat er nog steeds onvoldoende CO₂ emissies gereduceerd zijn in 2100. Al vanaf 2030 moeten de ontwikkelingslanden meedoen met emissiereducties²⁷.

²⁶ Bij deze projecties zijn de verdelingen van energieconsumptie voor geïndustrialiseerde landen incl voormalige Sovjet Unie en voor de ontwikkelingslanden gebruikt zoals in figuur 1.3 zijn aangegeven.

²⁷ Bron: zie figuur 1.13

De consumentenbondindicatie met (--/-/0/+ /++) beoordeling wordt in hoofdstuk 6 gebruikt om tot een optimale energiemix te komen. Waar harde numerieke gegevens ontbreken is op basis van de kennis binnen de groep een oordeel gegeven. De criteria zijn als volgt opgesteld:

1. Uitstoot²⁸

Beoordeling van de uitstoot van een optie met 2 aspecten:

- a) De uitstoot van broeikasgassen moet in de loop der tijd zo verminderen dat een stabilisatieniveau van (hoogstens) 550 ppm CO₂ (equivalent²⁹) wordt bereikt. Hoe langzamer de temperatuurstijging verloopt des te meer kans bestaat dat het klimaatsysteem zich zonder al te veel calamiteiten aanpast. Opties die de temperatuurstijging vertragen (of een lager niveau dan 550 ppm mogelijk maken) krijgen daarom een extra plusje.
- b) Uitstoot van andere stoffen met milieu- of gezondheidseffecten (SO₂, NO_x, vluchtige organische verbindingen, zware metalen, stof en roet, radio-actief afval e.d.) moet langs technologische weg kunnen worden geneutraliseerd.

2. Implementatie

De mogelijkheden of moeilijkheden bij de implementatie nagaan:

- a) concurrentie met andere bestemmingen, bijv landbouw (ruimtebeslag) of aanvliegeroutes vogels
- b) geluidshinder in de buurt van installatie (hinderwet)
- c) visuele opdringerigheid
- d) maatschappelijke acceptatie van de manier van energieconversie

3. Zekerheid

- a) is de optie sterk afhankelijk van aanvoer van overzee, en dus kwetsbaar ten tijde van internationale crises of oorlog
- b) is de optie gevoelig voor terroristische aanslagen, die de energievoorziening platleggen en/of gevaarlijke stoffen verspreiden
- c) kan de optie de wapenwedloop versterken, de internationale veiligheid in gevaar brengen; zijn eventuele waarborgen op dit gebied afdoende
- d) is de optie sterk afhankelijk van het weer (zon, wind); zijn de technologieën om deze afhankelijkheid te ondervangen afdoende
- e) zijn de installaties gevoelig voor onderhoud en de beschikbaarheid van hooggeschoold personeel
- f) is de optie gemakkelijk in te passen in het elektriciteitsnet

4. Potentieel

In 1998 was de wereldelektriciteitsproductie 13.6×10^{12} kWh of 49×10^{18} J_e.³⁰ Wij definiëren een optie als significant, als die een bijdrage levert van 2×10^{12} kWh of $7 \times$

²⁸ Deze milieu effecten moeten worden beschouwd voor de totale levenscyclus van een installatie, inclusief het opbouwen en ontmantelen, en het verwijderen van restanten en puin.

²⁹ Het effect van andere broeikasgassen dan CO₂ is omgerekend naar een equivalente CO₂-concentratie.

³⁰ de index e in J_e duidt op een elektrische Joule.

10^{18} J_e , dit was het niveau van kernenergie en iets minder dan het toenmalige niveau van hydro. Voor niet-elektrische opties als brandstoffen houden we hetzelfde getal aan. Waar nodig kan een vervangen fossiele of CO_2 -Joule worden gelijkgesteld met $1/3 J_e$.

Bij de beoordeling van het potentieel van een optie spelen de randvoorwaarden, genoemd in de andere punten een rol, evenals de prijs per kWh of per J_e .

- a) levert de optie een significante bijdrage op dit moment (0 jaar)
- b) na 5 jaar
- c) na 10 jaar
- d) na 20 jaar
- e) na 50 jaar.
- f) wat is het langere termijn potentieel van de optie, in kWh of J_e , rekening houdende met de randvoorwaarden, zoals in de andere punten aangegeven.
- g) wat is het langere termijn potentieel in termen van vermeden uitstoot van broeikasgassen, aan te geven in 'ton CO_2 vermeden'.
- h) wat is de prijs van 1 ton 'vermeden' CO_2 uitstoot

5. Duurzaamheid

Wij definiëren duurzaamheid als een zodanig beslag op energie en grondstoffen dat ook toekomstige generaties op een aanvaardbaar materieel niveau en in goede welstand kunnen leven.

- a) is de optie duurzaam op een termijn van 200 jaar?

6. Ontwikkelingslanden

- a) Is de optie bruikbaar/geschikt voor de stedelijke gebieden in ontwikkelingslanden
- b) idem voor de landelijke gebieden, zonder aansluiting aan het elektriciteitsnet

7. Gelijkheid

Vanuit de sociaal democratie heeft iedere wereldburger in principe dezelfde primaire rechten. Wij vertalen dit als:

- a) hetzelfde plafond voor emissie van broeikasgassen
- b) dezelfde rechten op grondstoffen.

Voor iedere optie is een consumentengids opgesteld volgens het schema, weergegeven in tabel 1.2. Een overzicht van de resultaten voor alle opties is gegeven in tabel 6.2.1, aan het einde van hoofdstuk 6.2.

Tabel 1.2 Consumentengids

Hoofdcriterium	Subcriterium	Consumenten-gids
1. Uitstoot	a. Broeikasgasuitstoot b. Overige vervuiling ("co-benefits")	--/0/+/++ --/0/+/++
2. Implementatie	a. Ruimtebeslag b. Geluidsoverlast c. Horizonvervuiling d. Maatschappelijke acceptatie	--/0/+/++ --/0/+/++ --/0/+/++ --/0/+/++
3. Zekerheid	a. Toevoerafhankelijkheid b. Terrorisme risico c. Proliferatie d. Weersafhankelijkheid e. Technologische eenvoud f. Inpasbaarheid bestaande infrastructuur	--/0/+/++ --/0/+/++ --/0/+/++ --/0/+/++ --/0/+/++ --/0/+/++
4. Potentieel	In termen van vermeden CO ₂ In termen van groeimogelijkheid	--/0/+/++ --/0/+/++
5. Duurzaamheid	Duurzaam over 200 jaar?	--/0/+/++
6. Ontwikkelingslanden	a. Stedelijke toepassing ontwikkelingslanden b. Rurale toepassing ontwikkelingslanden	--/0/+/++ --/0/+/++
7. Gelijkheid	Biedt de optie mogelijkheden om tot een gelijkwaardige voetafdruk in termen van broeikasgasuitstoot te komen?	--/0/+/++
Totaal		

2 Energiebesparing

In hoofdstuk 2.1 wordt een algemene beschouwing gegeven over energiebesparing met tal van voorbeelden van wat in Nederland op dit gebied mogelijk zou zijn. In hoofdstuk 2.2 volgt een korte beschouwing over warmte-krachtkoppeling (WKK).

2.1 Besparing door Bert Ritter

Trias energetica

Voor het beperken van energiegebruik en het verduurzamen van *welke situatie dan ook* bestaat een algemeen geldend concept, het heet "Trias Energetica" en bestaat uit drie stappen naar verduurzaming:

- *besparen op de behoefte*
- *duurzaam opvullen van de behoefte,*
- *voor de overgebleven posten terugvallen in niet-duurzame methoden.*

Het gaat ons in dit hoofdstuk om de eerste stap. Dat besparing de eerste stap is van trias energetica geeft wel aan hoe belangrijk het is om na te gaan in hoeverre besparing mogelijk is.

Begripsbepaling, wat is besparing en wat niet

Besparing is A minus B, de uitstoot/energiegebruik/verlies van de nieuwe situatie minus die van de oude situatie. En waaruit bestaat A en waaruit bestaat B? In dit document gaan we ervan uit dat zodra A en B op verschillende technieken berusten, het verschil is toe te rekenen aan de toegepaste technieken, en niet aan de besparing. Denk hierbij aan de overstap van gasverwarming van woningen naar warmtepompen. Besparing als entiteit op zichzelf, bestaat *alleen als de twee verschillende situaties op dezelfde techniek* zijn gebaseerd. Isolatie van huizen bijvoorbeeld is een besparingstechniek: de verwarming blijft op hetzelfde principe werken, alleen de vraag wordt verminderd. In de industrie is procesintegratie een besparingstechniek, de processen zelf veranderen niet fundamenteel, maar de verliesfactoren nemen af.

verliesbeperking

Verliesbeperking is vaak het resultaat van vier andere factoren: gedragsverandering, aangepaste marktwerking, regelgeving, en 'last but not least' voorlichting.

- *Gedragsverandering* is bijvoorbeeld het niet met de auto naar het werk gaan, maar met de fiets of het openbaar vervoer. Maar gedragsverandering is erg grillig in zijn effecten en alleen blijvend bij blijvende stimulering. In de industrie kan 'good-housekeeping' als gedragsverandering worden genoemd.
- *Aangepaste marktwerking* bestaat eruit dat –voorheen gratis- milieuschade een prijskaartje krijgt, denk aan het Kyoto-protocol met emissiehandel of de nieuw geïntroduceerde NOx handel in Nederland. Aangepaste marktwerking staat nog in de kinderschoenen en is voor het overgrote deel nog experimenteel van karakter.
- *Regelgeving* is 'ouderwets' en loopt aan tegen de grenzen van zijn toepassing door problemen met handhaving en ondoorzichtigheid. Regelgeving staat onder

druk vanwege het woud aan regels, de handhavingsproblemen en de wens om meer marktwerking te introduceren samen met een terugtrekkende overheid.

- *Voorlichting* is een niet te onderschatten maatregel om tot besparing te komen. Het klinkt als het intrappen van een open deur maar het is ongelooflijk hoeveel ondernemers voor hun installatiewerk blind varen op hun installateur. De installateur moet vaak prijsvechten en zal niet met het, in de aanschaf, iets duurdere maar energiezuiniger alternatief aankomen omdat hij met zijn duurdere alternatief de opdracht niet krijgt. Door de juiste benadering van zowel afnemers als leveranciers is nog veel te winnen. En dan hebben we het over budget-neutrale maatregelen voor ondernemers. De extra investering verdient zich in maximaal vijf jaar, maar vaak eerder, terug.

Tegenstrevers van besparing

De grote tegenstrever van besparing: groei

Er is nog een andere reden waarom besparing niet zaligmakend is, en dat is economische groei. Bij het stijgen van de welvaart neemt ook het energiegebruik steeds verder toe. Om effectief te zijn zal de besparing harder moeten lopen dan de welvaart het energiegebruik doet toenemen. Het programma DTO (Duurzame technologische ontwikkeling, vijf ministeries, 1998) greep terug op de formule van Barry Commoner waarin de milieubelasting (MB) wordt uitgedrukt in het product van bevolking (B), hun welvaartspeil per persoon (W) en de milieubelasting (M) per eenheid van welvaart: $MB = B \times W \times M$.

Om een idee te geven van de uitdaging die aan ons gesteld wordt, dient het volgende rekenvoorbeeld. Aan het einde van deze eeuw – of misschien wel eerder - is de wereldbevolking twee keer zo groot, en de wereldwijde welvaart ruwweg vijf keer zo groot geworden, dus de milieubelasting bij gelijkblijvende technieken in dat geval 10 keer zo groot. Door milieumaatregelen moet de milieubelasting een factor tien teruggebracht ten opzichte van vandaag om op hetzelfde niveau uit te komen. Voor het beperken van het klimaatteffect is de uitdaging nog groter want daar is het streven de uitstoot terug te brengen tot 25 %³¹ -oftewel een kwart- van het peil in 1990. Dat komt dus neer op een factor 40 vermindering van de uitstootintensiteit (de uitstoot per eenheid product) tot slechts 2½ % van de uitstoot-intensiteit die we nu wereldwijd hanteren. Dat betekent in feite emissievrij produceren en consumeren! Besparing of efficiencyverbetering kan een dergelijke ommekeer nooit bewerkstelligen. Het geeft aan dat de nadruk moet liggen op een transitie naar andere technologieën.

Besparing en tegenbeweging

Voor besparing geldt -naast groei- nog een tegenstrever, het zogenaamde 're-bound' effect, dat hier vertaald is door tegen-beweging. Tegen-beweging is het effect dat door een methode van energiebesparing in eerste instantie minderverbruik wordt gerealiseerd, maar vanwege dat minderverbruik andere meerverbruik opties levensvatbaar worden en voor extra verbruik zorgen. Een goed voorbeeld is de doorbraak van de energiezuinige PL-lamp. Aan de ene kant zorgde deze lampen voor een energiebesparing van 80 tot 85% voor verlichting, maar als gevolg van de sterk gereduceerde elektriciteitskosten

³¹ In de praktijk worden getallen van 20 tot 25 % genoemd.

besloten veel mensen om hun voordeur-verlichting continu te laten branden.

Besparing en verdunningseffect

De laatste tegenstrever van besparing is het verdunningseffect. Het effect geeft aan dat besparing op een bepaald aspect van gebruik weliswaar heel groot kan zijn, maar omdat het geheel van gebruik vele aspecten bevat is het algehele effect in de combinatie veel lager. Een voorbeeld is de zonneboiler op het dak voor tapwater (water voor de kraan en de douche). Met een zonneboiler voor tapwater kan een huishouden het tapwaterverbruik voor 50% met zonnewarmte dekken. Dat lijkt veel. Maar het gehele energiegebruik van een huishouden van vier personen bestaat uit verwarming, ventilatie, koken, elektra, vervoer en vakantie. Het aandeel van tapwater is in dit geheel minder dan 10%, waardoor de oorspronkelijke 50% besparing verdunt tot 5% van het totaal.

Oplossingsrichtingen

Hierboven is als indicatie aangegeven dat de intensiteit van milieubelasting een factor 10 moet verbeteren, maar dat de intensiteit van emissie een factor 40 moet verbeteren. Uit de vorige paragraaf volgt, dat *emissiereductie een factor 4 belangrijker is dan energie besparing*. Dat geeft wel aan dat besparing alleen niet de oplossing kan zijn. Om in onze behoeften te voorzien zullen nieuwe technieken rigoreus klimaatneutraal moeten zijn. Voor een dergelijke technologische ommezwaai is een enorme massa investeringen nodig. Hier kan besparing helpen om de nieuwe technieken te ontlasten, om ze eerder rendabel te maken, en om bestaande structuren een langere levensduur te gunnen. Besparing kan ervoor zorgen dat de nieuwe investeringen, hoewel groot, tot het minimum worden beperkt.

Voorbeeld: besparing in combinatie met nieuwe technologie

Aangezien CO₂-uitstootvermindering het belangrijkste doel is helpt het om te besparen, maar als de verwarming op gas blijft werken blijft het energiegebruik gekoppeld aan uitstoot. Indien alle uitstoot gestopt dient te worden geldt dat –bijvoorbeeld– gasverwarming moet worden vervangen door de warmtepomp op duurzame stroom. Maar bestaande huizen hebben een verwarmingsketel van 22-30 kW, en een warmtepomp kost dan 12.000 tot 18.000 euro. Een goedgeisoleerd huis heeft hooguit 5 kW aan verwarming nodig, en dan kost de warmtepomp slechts 3000 Euro. De besparende maatregelen zorgen dat de overstap op andere technieken betaalbaar wordt. Dat de warmtepomp dan ook voor een extra besparing kan zorgen is mooi meegenomen.

De huidige generatie warmtepompen heeft een COP van 3 à 4. Dat betekent dat bij gebruik van 1 Joule aan mechanische of elektrische energie men 3 à 4 Joule aan warmte binnen een woning of gebouw kan brengen³². Men mag echter verwachten dat de ontwikkeling naar warmtepompen met een hogere COP succes heeft. Een goede warmtepomp met een COP van 6 haalt dan 600% warmte uit windenergie ten opzichte van 100% rendement van elektrische verwarming met windelektriciteit. Je hebt daardoor minder windmolens nodig. Tenslotte zorgt een hoge COP ervoor dat de warmtepomp

³² Ground-source Heat Pumps, A World Overview, Renewable Energy World, July-August 2003, 218-227

uiterst weinig energie gebruikt en zich over zijn levensduur terugverdient, zeker als deze op nachtstroom mag draaien.³³⁾

Besparing is belangrijk, zeker gezien vanuit 'Trias Energetica', maar nieuwe technieken zullen het leeuwendeel van het werk moeten doen. In het geval van de warmtepomp ligt de winst duidelijk op de tweede stap van duurzame invulling.

potentieel

Met de factor 40 voor de noodzakelijke wereldwijde emissiereductie in gedachten is het wel even slikken om een route naar een nieuwe duurzame maatschappij uit te zetten. Vele energiezuinige alternatieven die gebaseerd zijn op fossiele brandstoffen vervallen. Het lijkt alsof zelfs de Trias Energetica hier het antwoord niet kan geven. Toch is er veel mogelijk. Op iedere vierkante meter in Nederland is de instraling van de zon jaarlijks het equivalent van 100 kuub gas, 3,4 GJ/jaar. Voor een gemiddeld rijtjeshuis met een dak van 40 m² is dat in combinatie met effectieve isolatie voldoende voor een jaarlijkse nulbalans van energie. Voor Nederland in zijn geheel is de jaarlijkse instraling het equivalent van 6.000 miljard kuub, de hele Nederlandse aargasvoorraad is 'slechts' 1.600 miljard kuub³⁴ en het jaarlijks aardgasverbruik ca. 40 miljard kuub. Om het potentieel van de zon te benutten moet Nederland wel grootschalig overstappen op zonne-energie met de bijbehorende kosten. Besparing kan daarbij flankeren, en de last draaglijk maken. Als door algemene besparingsmaatregelen de basisbehoefte met 20% kleiner gemaakt kan worden, zullen investeringen in nieuwe technologie ook ruwweg 20% kleiner uitvallen. En 20% besparing op een enorm bedrag is ook een enorm bedrag. Hiervoor staan vier eerder genoemde principes ter beschikking: gedragsverandering, aangepaste marktwerking, regelgeving, en voorlichting.

Stand van techniek, enkele voorbeelden

Voor de stand der besparingstechniek wordt hier gekeken naar drie sectoren: vervoer, woningbouw en industrie. Hierbij wordt volgens de lijnen van de trias energetica gewerkt: besparen, duurzaam opvullen, conventioneel opvullen.

Stand der techniek voor vervoer

Voor vervoer zijn een aantal categorieën te onderscheiden: vrachtwegvervoer, personenverkeer, openbaar vervoer, en vrachtscheepvaartverkeer. Voor al deze categorieën geldt dat het aandeel in de kosten van energiegebruik substantieel is, maar niet overheersend. Daardoor wordt er in de sector wel op energiegebruik gelet, maar wordt niet mee tot het uiterste gegaan om dit gebruik te beperken.

Vrachtwegvervoer:

Het energie gebruik van het vrachtwegvervoer is ruwweg 0,8 MJ per tonkilometer, waarbij de brandstof voor 99,999% uit diesel bestaat. Dit is een mooi aanknopingspunt indien het matigen van klimaat effecten primaire doelstelling wordt. Diesel is redelijk eenvoudig te vervangen door biodiesel (zie hoofdstuk 3.5), al zal de aanvoer van biodiesel de eerste

³³ zie bijv www.techneco.nl

³⁴ OPEC annual statistical bulletin 2001, table 34

tien of twintig jaar op geen stukken na de gehele behoefte kunnen dekken. Maar omschakeling naar biodiesel is relatief eenvoudig, zeker als het in eerste instantie via bijmenging in reguliere diesel plaatsvindt. Maar besparing is voorlopig niet echt haalbaar. Rendementen van huidige dieselmotoren kunnen geen factoren verbeteren, hooguit procenten. Aanvullende besparing dient te komen uit efficiency verhoging en verhoging van de beladingsgraad. Dit zal extra inspanning en toepassing van ICT-technieken vereisen. Verdere integratie met spoor en water kan ook energiereductie realiseren.

Personenwegvervoer

Om energiegebruik van personenvervoersbewegingen over de weg te verminderen zijn voornamelijk gedragsveranderingen voorhanden. Telewerken, gedeeld autogebruik, autodelen (Carpoolen) zijn hiervan de belangrijkste. Deze maatregelen richten zich voornamelijk op de forens die binnen de stad of regio blijft. Maar de effecten zijn beperkt. Zo geeft het centrum voor energiestudies³⁵ aan dat het effect van telewerken kan zijn dat 20% van de woon-werk verkeer vervalst. Maar daar staat een tegenbeweging tegenover, met ook nog een verdunningseffect³⁶, waardoor het effect van telewerken tot onder de 5% zakt.

Zuinige auto's kunnen veel meer besparen: een speciaal project van Greenpeace heeft ooit een Renault Twingo omgebouwd waarna deze 1 op 30 reed, waar het daarvoor nog 1 liter benzine op 15 km verbruikte. De maatregelen bestonden uit spoilers, gewichtsreductie en speciale uitvoering van de motor. Maar volkswagen heeft een conceptauto die 1 op 100 gebruikt, en bij zuinigheidsraces na de oliecrisis in de jaren tachtig van de vorige eeuw werd met heel speciale, fragiele wagentjes 1 op 1500 of beter gereden. En er is natuurlijk nu de Nuna die op electriciteit rijdt: 0 op 1.

Stand der techniek voor woningbouw

De huidige nederlandse woning gebruikt gemiddeld 2000 kuub aardgas per jaar, en tussen de 1000 en 2000 kWh elektriciteit per jaar. De nieuwbouw dient te voldoen aan de wettelijke eis van EPC=1 of beter, d.w.z. lager³⁷, en komt uit op een gemiddeld gebruik van 1000 kuub aardgas per jaar, en ruwweg evenveel elektra gebruik als voorheen, namelijk 1000 à 2000 kWh. De EPC-eis kan met gemak naar 0,7 gezien de vooruitgang in duurzame technieken en wat er aan zuinige woningen wordt neergezet. Een sterke lobby van de bouwsector verhindert dit echter.

Om aan te geven wat in principe haalbaar is dient men te beseffen dat er op iedere vierkante meter in Nederland het equivalent van –bruto- 100 kuub aardgas neergestraald wordt door de zon. Daarnaast is er ook nog een potentieel van wind per vierkante meter vertikaal oppervlak, ruwweg 150 kWh/m²/jaar. Daaruit blijkt al dat het grote potentieel in de zonne-energie zit,. Voor een gemiddeld rijtjes huis is het dakoppervlak ca 40 m², en de zonne-energie dus gelijkwaardig aan ruwweg 4000 kuub aardgas. Die 4000 kuub kun je met PV panelen omzetten in ofwel maximaal 4000 kWh elektriciteit, ofwel 2000 kuub warmte voor tapwater, verwarming en ventilatie. Een dak, dat 50-50 voor warmwater en elektriciteit is ingericht levert dan 2000 kWh elektriciteit en 1000 kuub warmte. Dit komt overeen met het jaarverbruik van een moderne woning met EPC=1. Maar let op, de

³⁵ www.ce.nl

³⁶ woonwerkverkeer is minder dan de helft van het totale verkeer

³⁷ EPC= Energie Prestatie Coefficient

zonne-energie valt vooral in de zomer op het dak, en niet in de winter wanneer je het voor verwarming nodig hebt. Er zijn dus wel aanvullende maatregelen nodig. De stand der techniek is dat de energie leverbaar is, maar dat de buffering en seizoensopslag nog net niet lukken. De mogelijkheden zijn hier echter nog niet uitgeput.

Nul-energie- en nul-emissiewoning

Een voorbeeld van het potentieel van besparing is de Nul-Energie-Nul-Emissiewoning, dat wil zeggen: nul-energie voor elektra, verwarming, ventilatie en tapwater. Deze woning is nu al haalbaar door maximaal te isoleren en maximaal gebruik te maken van zonne-energie en hoeft niet duurder uit te vallen dan bestaande woningen³⁸. Maar een dergelijke woning heeft tot dusver nog altijd een elektriciteits aansluiting nodig om de donkere dagen rond de jaarwisseling te verlichten, en in de zomer is er een overschot aan elektriciteit, dat wordt teruggeleverd. De besparing is dus relatief gesproken 100%, want over het jaar genomen is de energiebehoefte nul. Bovenstaande geeft ook aan dat er een grens zit aan wat er te besparen valt. Zo is voor een flat een nul-energie optie niet mogelijk, vanwege het relatief geringe dakoppervlak ten opzichte van het aantal woningen. Kies je echter voor elektrische warmtepompen, dan kun je met isolatie en duurzame elektriciteit in ieder geval wel een emissievrije situatie creëren.

Potentieel van woning renovatie

De bestaande woningvoorraad is nog lang niet energievriendelijk. Daar valt nog heel veel te besparen. Er zijn zelfs ideeën die ervan uitgaan dat van de meeste bestaande woningen nul-energie woningen gemaakt kunnen worden, maar dat is betwist, al gaat het dan vooral om de kosten. Een halvering is meestal wel haalbaar met aanvullende isolatie en aangepast ventilatie gedrag. Zo kan aan de buitenzijde van een woning aanvullende isolatie –samen met HR++ glas- aangebracht worden, tot bijna elke dikte die gewenst is. Alleen de kostenfactor zal hier een haalbare dikte voorschrijven. Daarbij is het dan wel raadzaam om verhoogd comfort in de prijsberekening mee te tellen. Een goed geïsoleerd huis is comfortabeler door gelijkmatiger warmte, minder tocht en betere binnenluchtkwaliteit. Toch staan veel vaklieden en bewoners hier huiverig tegenover, omdat er in het verleden veel beginnersfouten zijn gemaakt. Isoleren aan de buitenkant voorkomt vochtproblemen in de oude constructie, maar de constructies en noodzakelijke materialen, cellulosevilt of glaswol of natuurlijke wol, zijn niet gangbaar in de huidige woningbouw. Mechanische ventilatie heeft een slechte reputatie omdat ventilatiesystemen van bestaande woningbouw op minimale kosten zijn uitgevoerd met gieren en suizen als gevolg. Maar met een 10-20% hoger kosten niveau valt een goed of zelfs luxe systeem te realiseren dat ook nog eens zeer zuinig is.

Potentieel voor kantoren

Voor kantoren zijn enkele factoren anders dan bij woningbouw. Het energiegebruik is anders van samenstelling, het elektriciteitsgebruik is hoger en het dakoppervlak voor hoogbouwkantoren is relatief kleiner. En niet te vergeten, de wettelijke EPC eis voor nieuwbouw is veel ruimer dan voor woningen, EPC = 1,5 ipv 1,0. Maar ook hier is met renovatie veel te winnen. Veel oudere kantoren kampen met een interne oververhitting door alle elektronica en computersystemen. Daar wordt dan weer een koelinstallatie tegenover gezet. Een optimale oplossing is een grondwater-koelsysteem voor de zomer, met een warmtepompsysteem en laagtemperatuurs-verwarmingsnet voor de winter. Het dakoppervlak kan dan worden benut voor zonnepanelen, ofwel voor elektriciteit in geval

³⁸ Gezond bouwen en wonen, 2003-1

van een kantoorpand met veel computers, ofwel voor warmproceswater in geval van een half industrieel gebouw.

Maar bij kantoorpanden is degene die de energierekening betaalt vaak niet degene die de investeringsbeslissing neemt. En omdat het investeringsbedrag voor energie-vriendelijke systemen hoger is dan gebruikelijk, komt het door dit soort mechanismen niet tot innovatie, ondanks het feit dat het zich over de jaren terugverdient,. Een mogelijke aanpak kan de ROMBO techniek zijn, die in de gemeente Den Haag is ontwikkeld. ROMBO staat voor Ruimtelijke Ordening en Milieu Beleids Ontwerp. Het is een methode die aansluit bij de 'checklist ruimtelijke ordening en milieu' en bij het 'nationaal pakket duurzame Stedebouw'. Heel in het kort richt de aanpak zich op het bij elkaar zetten van alle betrokken partijen, en het daarna slim uitruilen van wederzijdse voordelen.

*Industrie*³⁹

Al in de jaren negentig is de overheid via het ministerie van economische zaken met bedrijven via de branches een meerjarenafspraak (MJA) aangegaan. In de MJA zijn per branche doelen gesteld voor verbetering van de energie-efficiency; de eerste ronde heet MJA1; het vervolg MJA2 is gestart eind 2001 en loopt tot 2012. Niet geheel toevallig komt dit overeen met de eerste periode van het Kyoto protocol. In aanvulling op de MJA2, is er een traject gestart dat 'benchmarking' heet. Bedrijven geven zelf aan of ze onder MJA of 'benchmarking' willen vallen. Om energie-intensieve bedrijven te laten concurreren met buitenlandse bedrijven is er geen besparingsdoel afgesproken, maar de afspraak gemaakt dat ze behoren tot de wereldtop qua energieefficiency.

MJA2 heeft een aantal uitbreidingen ten opzichte van MJA1. Op aangeven van bedrijven is er meer ruimte om optimalisatie in de productieketen te realiseren, waar dat in MJA1 alleen nog kon binnen het eigen bedrijf. Toegevoegde thema's zijn duurzaam produceren, duurzame bedrijfsterreinen, en verbeterde logistiek. Producten kunnen energiezuiniger ontworpen worden. Ze kunnen lichter uitgevoerd worden, waardoor ze minder schaarse grondstoffen gebruiken, en de distributie minder energie kost. Producten kunnen ten slotte ook met een langere levensduur worden ontworpen, waardoor over de jaren minder grondstoffen worden gebruikt.

Bedrijventerreinen kunnen optimaliseren door uitwisselen van reststromen aan warmte of water. Andere verbeteringen zijn het gezamenlijk inzamelen van afval en collectief vervoeren van producten. Merkwaardig genoeg wordt warmte-kracht-koppeling hier niet genoemd, terwijl op industrieterreinen vaak juist gelijktijdig warmte en energie wordt gebruikt.

Eerste resultaten energiebesparing MJA2.

De energiebesparing die per branche als doel wordt gesteld is het eindresultaat van vele stappen. Zonder in details te treden gaat het hierbij om een haalbaarheidsplan, een controlesysteem en rapportage. Bij het vaststellen van de doelstelling worden drie criteria gehanteerd, ALARA (As low as reasonable achievable = zo laag als redelijkerwijs haalbaar geacht), een interne rentabiliteit van 15% of een terugverdientijd van 5 jaar. Op

³⁹ Deze paragraaf is voornamelijk gebaseerd op de ervaringen van de meerjaren afspraken (MJA).
www.mja.novem.nl

basis van deze criteria geven branches een zekere energiebesparing aan voor de periode 2001-2004. De te halen besparingen lopen uiteen van 2 tot 11%.

Helaas zijn er ook enkele branches die terugzakken in efficiency vanwege de laagconjunctuur, een lagere bezettingsgraad en hogere productspecificaties. De grootste teruggang is in de branche margarines, oliën en vetten met 6%. Nieuwkomers die niet meegedaan hebben met MJA1 halen besparingen tot bijv. 24%, zoals in 2002 voor de tapijtindustrie. Helaas is dit een kleine speler in het geheel; voor de hele sector industrie komt de efficiencyverbetering uit op 10%. Maar let op, doordat de productie evenveel toeneemt, is het absolute energiegebruik bijna gelijkgebleven op 70 PJ⁴⁰.

Financiële aspecten

“Waar het niets kost, valt niets te besparen”.

Iedere econoom zal bovenstaand citaat beamen. Kijk naar de industrie: als energiekosten -en daaruit volgende de emissie- slechts 5% van de bedrijfskosten uitmaken, dan staat energie op een lage plaats in de aandacht van de bedrijfsleiding. Alleen waar energie een substantieel aandeel in de kosten opeist zal energie-besparing een primair onderdeel van de bedrijfsvoering zijn. In de praktijk blijkt dat bedrijven energie pas als prioriteit gaan beoordelen als de exploitatie voor een kwart of meer uit energiekosten bestaat. Als we dat pragmatisch willen benaderen zouden we dus de energieprijzen moeten verzesvoudigen, want dan schiet deze van 5% naar 25% (= 30%/ 125%), en valt energiebesparing voor iedereen in de prioriteiten. Het is duidelijk dat een dergelijke draconische maatregel op veel verzet zal stuiten. En terecht, want het is onnodig en er bestaat een goedkopere oplossing via marktwerking.

Iets dat niets kost zal verkwist worden volgens de economen, en tot nu toe lijkt het er op dat ze gelijk hebben. Economie van vraag en aanbod geldt niet voor gratis goederen, of ze nu materieel of immaterieel zijn. Gratis goederen zijn niet schaars, en de economie van vraag en aanbod heeft zijn fundament op schaarste gebaseerd. Emissies en milieuschade waren tot nu toe altijd gratis. De enige sturing en beperking op emissie was regelgeving door de overheid. Nadeel van de benadering via regelgeving is dat er geen economische optimalisatie plaatsvindt. Het kan daardoor duurder uitvallen doordat het kansen laat liggen waar maatregelen relatief goedkoop zijn, en beperkingen forceert waar maatregelen relatief duur zijn.

monetarisatie

Economen geven al langer aan dat emissies en milieuschade een prijs moeten krijgen en verhandelbaar moeten worden voordat enige vorm van optimalisatie kan plaatsvinden. Door marktwerking op emissies te introduceren kan het economisch mechanisme voor een veel lagere prijs zorgen. Want in een economische markt met vraag en aanbod zal de prijs het laagste punt opzoeken: die optie aan de aanbod-zijde die voor de laagste prijs de vraag aan de gebruikerszijde kan vervullen. Dit is het principe achter de uitwerking van het Kyoto protocol. Een project dat emissies reduceert houdt emissierechten over, en een bedrijf dat teveel emissies heeft kan deze compenseren met de aankoop van het overschot aan emissierechten van anderen. De emissierechten zijn verhandelbaar en zodra er marktwerking ontstaat zal er vraag en aanbod ontstaan.

⁴⁰ Het voert hier te ver om per branche de resultaten en doelstellingen door te nemen. Zie daarvoor MJArapport_2002.pdf op www.mja.novem.nl

Degene die de uitstoot veroorzaakt heeft op dat moment de keuze, of hij start zelf een project om emissie te reduceren, of hij koopt emissierechten als dat goedkoper uitvalt.

Grenzen van monetarisatie

Niet alle milieu problemen zijn met monetarisatie op te lossen. Zo is bijvoorbeeld natuurbehoud wel voor een deel te monetariseren, maar niet geheel. Zo blijkt het – voorlopig- een goed idee om lokale bevolking het beheer van wild in afrikaanse wildparken te geven. De opbrengst van jacht is dan een reden om het dierenleven als inkomstenbron te gaan zien die beschermd moet worden. Stropen is in een dergelijk plaatje contra-productief geworden. Een evenwichtig natuurbehoud is hiermee echter niet gegarandeerd. Zo kan er door de plaatselijke bevolking gekozen worden om zich toe te leggen op een bepaalde, financieel lucratieve diersoort om met afschot de overige soorten te marginaliseren.

Iets dergelijks geldt ook voor emissiehandel. Mocht biomassa als bron voor emissierechten doorbreken, dan kan het effect zijn dat er geen ongerepte natuur overblijft, maar dat iedere hectare bos eens per twintig jaar gekapt gaat worden voor de biomassa. Als de herplanting representatief is voor wat er gekapt is dan kunnen de effecten wel meevallen, maar indien de herbepanting alleen bestaat uit snelle groeiers met maximale opbrengst dan blijft van alle ongerepte natuur met een ruime biodiversiteit niet veel meer over dan een monocultuur van productiebos.

Samenvatting en conclusie

Als de milieubelasting (MB) wordt uitgedrukt in het product van bevolking (B), hun welvaartspeil (W) en de milieubelasting per eenheid van welvaart (M), ($MB = B \times W \times M$), zal voor reductie van broeikasgassen naar 25% van het niveau van 1990 een intensiteitsreductie met een factor 40 nodig zijn. Onze 'emissie-intensiteit per eenheid welvaart' moet tot 2½ % van het huidige peil worden teruggebracht. Dit komt neer op een praktisch emissievrije maatschappij, en is een ernstige beperking bij zoeken van oplossingen.

Op iedere vierkante meter in Nederland is de instraling van de zon jaarlijks het equivalent van 100 kuub gas, namelijk 3,4 GJ/jaar. Voor een gemiddeld rijtjeshuis met een dak van 40 m² is dat in combinatie met effectieve isolatie voldoende voor een jaarlijkse nulbalans van energie. Voor Nederland in zijn geheel is de jaarlijkse instraling het equivalent van 3600 miljard kuub, de hele Nederlandse aargasvoorraad is 'slechts' 1616 miljard kuub⁴¹ en het jaarlijks aardgasverbruik ca. 40 miljard kuub.

Besparing alleen kan niet de oplossing zijn. Een grondige herstructurering naar emissievrije energievoorziening kan wel betaalbaar zijn indien eerst de energie-behoefte verminderd wordt (trias energetica).

Gedragsverandering is onvoldoende betrouwbaar in zijn resultaten om daar volledig op te vertrouwen. Andere mogelijkheden zijn regelgeving, monetarisering, en voorlichting. De overheid kan met deze drie instrumenten invloed uit oefenen ten tijde van het 'beslismoment' over nieuw aan te schaffen voorzieningen. Deze voorzieningen blijven dan over hun hele levensduur hun vruchten afwerpen.

⁴¹ OPEC annual statistical bulletin 2001, table 34

Het is goed te beseffen dat er partijen zijn die **niet** gebaat zijn bij besparing, ook al is de gebruiker of klant er voordeliger mee uit! Vooral in sterk concurrerende markten, waar de vakman moet opboksen tegen prijsvechters, kan een sub-optimaal systeem geïnstalleerd worden dat nog jaren zijn slechte invloed heeft. In dit licht is het voor de overheid logisch om de slechtste alternatieven te verbieden, zeker indien er marktconforme, betere oplossingen voor handen zijn. Kandidaten voor een verbod zijn bijvoorbeeld: alle soorten elektrische verwarming met uitzondering van de elektrische warmtepomp met een COP=3 of beter, gloeilampen, laagrendement gasketels, airconditioning op basis van koelmachine.

2.2 De noodzaak van warmte-kracht koppeling (WKK) door Marco Mensink

Warmte Kracht Koppeling (WKK, in het engels CHP= Combined Heat Power) is een verzamelnaam voor verschillende manieren om de restwarmte die bij elektriciteitsproductie vrijkomt nuttig te gebruiken. WKK is goed voor een betrouwbare, vrij schone energievoorziening. Hieronder worden de volgende punten besproken:

1. De energie uitdagingen voor de komende 50 jaar.
2. Wat is WKK en wat zijn de sterke en zwakke punten
3. Wat kan WKK bijdragen aan de oplossing van de problemen
4. Wat moet daarvoor nu gebeuren in Nederland

Energie uitdagingen voor de komende 50 jaar

In de periode 1950 – 2050 zal de belasting van de mensheid op de aarde ten aanzien van energieverbruik met een factor 1000 toenemen. De groei van de wereld-bevolking, toenemende welvaart en toenemende energie-intensiteit van de economie zijn de redenen voor deze explosie. Rond 2025 moet er gekozen worden welke infrastructuur in 2050 nodig is. Op dit moment zijn geen technologieën noch brandstoffen voorzien die deze uitdaging kunnen beantwoorden binnen thans maatschappelijk wenselijk geachte randvoorwaarden.

Onduidelijk is thans welke keuze(s) gemaakt zullen worden en of voldoende tijd en kapitaal beschikbaar is voor implementatie. Naast mondiale kwantitatieve aspecten van energievoorziening spelen vragen over de kwaliteit (emissie, bijdrage aan klimaatverandering, betrouwbaarheid, betaalbaarheid, etc) en verdeling (grondstoffen, emissies, energie=welvaart, Noord-Zuid, etc). Nederland heeft haar eigen deel van deze inherent mondiale problematiek. Maar ook haar eigen rol en mogelijkheden vanwege onze unieke positie in de gaswereld en vanwege ons belang om niet onder water te komen staan ten gevolge van klimaatverandering.

De sterke en zwakke punten van WKK

Bij de conversie van een brandstof als kolen of gas in elektriciteit komt zeer veel energie vrij in de vorm van warmte. Over de hele wereld betreft dit 2/3 van de gebruikte energie, in Nederland meer dan de helft. Deze energie wordt geloosd in koelwater of in de lucht. WKK-installaties benutten die warmte in industriële processen of voor ruimteverwarming van huizen (via stadsverwarming) of kassen. Daarmee verdubbelt de efficiency van de conversie, wordt brandstof en CO₂-emissie bespaard, verlagen de kosten voor Transport en Distributie en vermindert het ruimtebeslag.

De synergie die bij WKK optreedt heeft het nadeel dat dit soort installaties minder flexibel zijn. Er moet immers met meerdere belangen rekening gehouden worden (producenten of gebruikers van gas, elektriciteit, warmte, etc). Bij de huidige lage elektriciteitsprijzen en hoge gasprijzen renderen WKK installaties onvoldoende voor een continuïteit op de lange termijn.

Door goed stimulerend overheidsbeleid is WKK in Nederland gegroeid tot ongeveer 8000 MWe, waarmee meer dan 40% van de Nederlandse elektriciteitsvraag wordt voorzien. Nederland is daarmee in Europa een koploper.

WKK in Nederland was en is een hoeksteen van het klimaatbeleid. In de Uitvoeringsnota Klimaatbeleid 1999 was een groei van WKK vermogen tot 15000 MWe voorzien, hetgeen 20 miljoen ton CO₂ zou reduceren, 80% van de Nederlandse binnenlandse reductiedoelstelling.

Wat WKK kan bijdragen aan de oplossing van het klimaatprobleem

Het principe van Warmte-Kracht-Koppeling is onafhankelijk van de brandstof. Het gebruikt restwarmte uit kolen- of gasgestookte elektriciteit centrales, maar werkt ook met restwarmte uit biomassaverbranding of uit kernsplijting. Met een keuze voor WKK worden opties voor verschillende brandstofscenario's deels open gehouden.

Een voordeel van gasgestookte WKK is dat het een transitie naar andere soorten gas dan aardgas (menggas, waterstof) mogelijk maakt. Gasgestookte WKK lijkt daarmee de aangewezen, flexibele weg naar decentrale energieconversiesystemen. Binnen zulke decentrale systemen zullen ook duurzame conversievormen uit wind, zon, water en tussenvormen als schoon-fossiel elkaar aanvullende rollen spelen.

In Nederland komt nu meer dan 70% van de CO₂-reductie bij elektriciteit uit WKK, de overige 30% uit wind, zon, biogas en water.

Verdere bijdragen van WKK aan een duurzame energievoorziening kunnen plaats vinden door het verder benutten van beschikbare restwarmte en het door WKK laten verzorgen van meer warmtevraag. Dat laatste kan nog in industriële processen en ruimteverwarming. Voor beide toepassingen is de verdergaande verkleining van de schaal van WKK-installaties van belang. Micro-WKK installaties die voor een enkel huis of een blok huizen de verwarming, koeling en elektriciteit verzorgen komen binnen handbereik.

Nederland heeft een speciale rol te spelen in de ontwikkeling van decentrale energie systemen. Nergens op de wereld is zo'n unieke samenloop van veel geld, veel kennis over decentrale energiesystemen en WKK, zoveel aardgas en zo'n goede infrastructuur, zoveel energiegebruik - zowel door de dichtheid van de welvarende bevolking als door de aanwezigheid van energie-intensieve industrie, zoveel reeds aanwezige decentrale elektriciteit conversie/opwek (40+%) en zoveel noodzaak iets aan klimaatverandering te doen.... als in Nederland.

De unieke plaats van Nederland IN DE WERELD noopt het hier tot nu toe succesvol lopend experiment met decentrale energie systemen voort te zetten. Grote storingen in Italië, Denemarken/Zweden, Londen, Noord-Oost VS krijgen veel aandacht. Tennet zegt terecht dat de kans daarop in Nederland niet zo groot is dankzij ons hoog percentage decentraal vermogen en ons fijn vermaasd distributienet. Het is daarom opportuun de voordelen van decentraal vermogen ten opzichte van centrale elektriciteit productie en grootschalige netten van Transport en Distributie (T en D) nog eens op een rijtje te zetten:

- minder transport en distributie, dus goedkoper T en D- systeem
- stabielere T&D door een minder kwetsbaar net en kleinere invoer

- brandstofbesparing door hogere efficiency van WKK en door inzet van duurzame energie
- reductie van CO₂-emissie

Er zijn schattingen dat een gedecentraliseerd elektriciteitssysteem tot 1/3 van de kosten van een gecentraliseerd systeem kan besparen.

Wat er moet gebeuren in Nederland

Bewustwording van de mondiale problematiek en de Nederlandse kansen aan de oplossing daarvan een bijdrage te leveren is eerste prioriteit. Een verstandig Nederlands energiebeleid, waarbij kansrijke decentrale methoden beschermd en bevorderd worden totdat eerlijke concurrentie tussen brandstoffen en conversiemethoden binnen Europa gerealiseerd is, geeft daaraan inhoud. Het stimuleren van nieuwbouw WKK lijkt de enige weg om tijdig een betrouwbare aanvulling van het Nederlands elektriciteitsproductie park te realiseren, op een manier die binnen de Kyoto CO₂-doelstellingen past.

Samenvatting en conclusies voor hoofdstukken 2.1 en 2.2

De maatregelen zoals beschreven in dit hoofdstuk scoren grotendeels positief op de aangelegde criteria. Wij lopen ze toch even na

Uitstoot

Broeikasgasuitstoot (CO₂) zal verminderen. Uitstoot van andere schadelijke gassen zal eveneens verminderen.

Implementatie

Ruimtebeslag en geluidsoverlast zijn afwezig of gering. Er is geen sprake van horizonvervuiling, alleen de maatschappelijke acceptatie van nieuwe, beparende installaties laat wat te wensen over.

Voorzieningszekerheid

Er is geen toevoerafhankelijkheid, weersafhankelijkheid, noch een terrorismerisico. Omdat de benodigde hoeveelheid energie afneemt, neemt de voorzieningszekerheid toe. De kosten zullen echter niet altijd laag zijn en sommige voorzieningen kunnen afhangen van de weersgesteldheid.

Potentieel

Het potentieel wordt hoog ingeschat. Een besparing van 25 % van het geprojecteerde energieverbruik zou haalbaar kunnen zijn.

Duurzaamheid

Alle voorzieningen zijn duurzaam, al zullen installaties een eindige levensduur hebben en vervangen moeten worden.

Ontwikkelingslanden

Veel maatregelen vereisen een zeker niveau van technisch kunnen, die in ontwikkelingslanden niet altijd aanwezig is.

Gelijkheid

Afgezien van het vorige punt kosten veel maatregelen weinig materialen en grondstoffen.

3 Hernieuwbare bronnen van energie

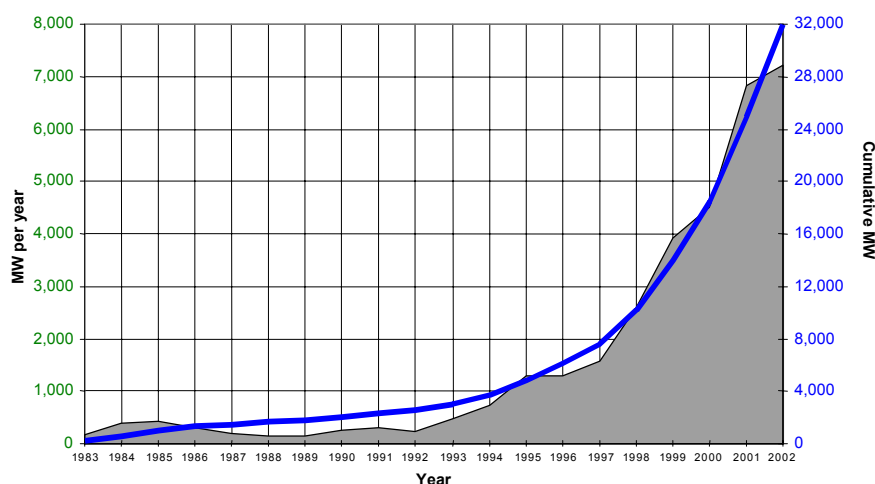
In dit hoofdstuk worden de belangrijkste bronnen van duurzame energie besproken. De meeste van die bronnen zijn direct of indirect afkomstig van het binnenkomende zonlicht. De natuurwetenschappelijke principes waarop zij zijn gebaseerd worden kort besproken en er worden pogingen gedaan om het bruikbare potentieel te schatten. Hierbij wordt in elk geval aandacht geschonken aan het niveau van de EU15, omdat daarvoor veel gegevens en publikaties aanwezig zijn. Binnen dat kader komt natuurlijk ook Nederland ter sprake.

Waterstof is een energiedrager, net zoals electriciteit, en geen energiebron. Er is echter veel discussie over een waterstofeconomie, waarin waterstof onder meer wordt gebruikt als middel om de energie van wisselende bronnen zoals zon en wind op te slaan. Vandaar dat het laatste onderdeel van dit hoofdstuk aan waterstof is gewijd.

3.1 Windenergie door Marc Beurskens

Huidige situatie

Bij moderne windturbines zoals men die overal in Nederland kan zien, wordt de energie in de wind door de draaiende windturbines omgezet in electriciteit. Windenergie is, na waterkracht, op dit moment de meest concurrerende vorm van duurzame energie. De jaarlijkse groeicijfer zijn indrukwekkend. In het totaal staat er op de hele wereld al 32000 MW aan windmolens geïnstalleerd. Bovendien zijn de groeicijfers de afgelopen 5 jaar imposant; een gemiddelde groei van 33% per jaar (Figuur 3.1.1). De Europese Unie speelt in de windenergiesector een leidende rol, waarbij Duitsland, Denemarken en Spanje de boventoon voeren. Tabel 3.1.1 geeft een overzicht van de groei en het geïnstalleerd vermogen voor de grootste spelers in de windenergiesector. In Denemarken wordt maar liefst 18.5% van de jaarproductie aan electriciteit geleverd door windmolens.



Figuur 3.1.1: Jaarlijks geplaatst en cumulatieve windenergievermogen in de wereld. Het gearceerde gedeelte, met de linkschaal, geeft het geplaatste vermogen per jaar. De getrokken kromme met de rechterschaal geeft het totaal geïnstalleerd vermogen op wereldschaal⁴².

⁴² BTM consult, maart 2003.

Stand van de techniek

De meeste bestaande windmolens in de wereld zijn op land, “on-shore”, geplaatst. Elektriciteit wordt opgewekt met twee - of driebladige molens met een piekvermogen variërend van 50 kW tot 3 MW. Gemiddeld genomen hebben windmolens een vermogen van 600 kW, maar dit gemiddelde is stijgende omdat nieuwe technologieën grotere en krachtigere molens mogelijk maken. Een 600 kW molen heeft gemiddeld een blad diameter van 35 meter en is gemonteerd op een 50 meter hoge toren. Dat betekent dat de bladen een cirkel beslaan met een middellijn van 35 meter. Windmolens op zee zijn groter. In het binnenland worden tegenwoordig ook al veel hogere molens gebouwd.

Tabel 3.1.1: geïnstalleerd vermogen en verwachte productie van windenergie in 2003.⁴³ Bron:

Land of regio	Geplaatst in 2001 (MW)	Geplaatst in 2002 (MW)	Totaal geplaatst 2002 (MW)	Verwachte productie in 2003 (TWh)	Totaal elektriciteit consumptie 2000 (TWh)	Aandeel in elektriciteit van Wind
Duitsland	2,627	3,247	11,968	23	550	4%
Spanje	1,050	1,493	5,043	11.6	210	5.5%
Denemarken	115	530	2,880	6.5	35	18.5%
EU	4,527	6,163	23,832	48	2,500	2%
VS	1,635	429	4,674	9.4	3,400	0.3%
Wereld	6,824	7,227	32,037	65	14,000	0.45%



Figuur 3.1.2: Horns Rev windmolenpark zoals gezien vanuit de kust op een heldere dag.⁴⁴

Het technisch potentieel van windmolens op land is erg groot. Volgens een rapport van de EWEA⁴⁵ “Windforce 12” is het technisch potentieel op land een paar keer zo groot als de huidige wereldbehoefte aan elektriciteit. In de praktijk echter blijkt dat dit potentieel beperkt is vanwege planologische randvoorwaarden. Daarom wordt ook gekeken naar mogelijkheden voor wind op zee, “off-shore”. Het meest indrukwekkende voorbeeld van een windpark op zee is het Horns Rev windpark in Denemarken. Een park met 80 molens van 2 MW piekvermogen is in 2002 gebouwd (Figuur 3.1.2). Deze windmolens

⁴³ BTM consult, maart 2003

⁴⁴ www.hornsrev.dk

⁴⁵ EWEA=European Wind Energy Association. “Wind force 12; A blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020”

hebben bladen van 80 meter middellijn. Die zijn geïnstalleerd op torens van 70 meter hoog. Omdat de molens zo'n 15 à 20 km uit de kust zijn geplaatst zijn ze maar beperkt zichtbaar vanaf het strand.

Fluctuerende energiebron

Windenergie is op de meeste plekken een fluctuerende bron van elektriciteit: de windsnelheid wisselt sterk in de loop der tijd. Spreiding van windmolens om die wisselingen op te vangen in het elektriciteitsnet is slechts ten dele een oplossing, omdat windsnelheden sterk gecorreleerd zijn over zeer grote gebieden. Een studie van de universiteit van Rostock⁴⁶ laat zien dat Duitse windsnelheden voor de Noordzee, Oostzee en het binnenland sterke seizoensvariaties hebben (figuur 3.1.3), maar ook dat variaties van dag tot dag hetzelfde zijn voor alle drie de gebieden. Het is echter denkbaar om over veel grotere afstanden de elektriciteitsnetten te koppelen en daarmee de fluctuaties onder controle te houden. Zie hoofdstuk 6.1.

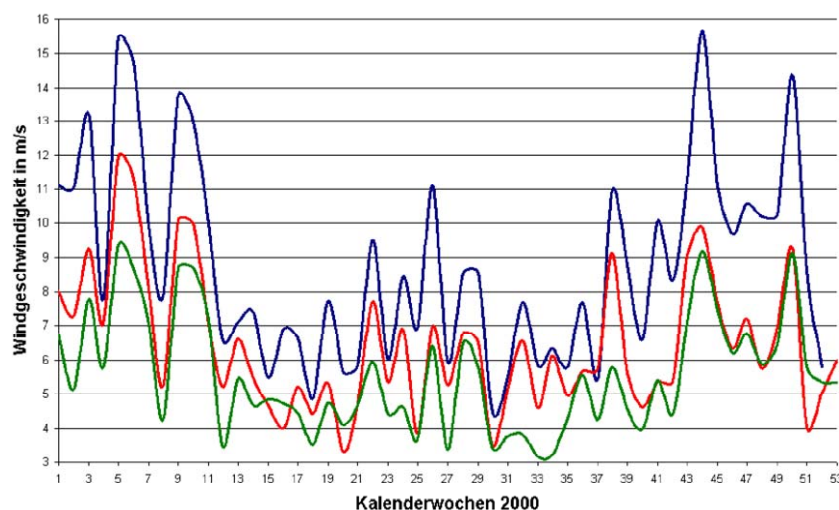


Bild 1: durchschnittliche Windgeschwindigkeiten an ausgewählten Standorten

Blau: Nordsee

Rot: Ostsee

Grün: Binnenland

Figuur 3.1.3: Gemiddelde windsnelheid in drie verschillende regio's in Duitsland. De drie krommen vertonen sterke correlaties. Fluctuaties van windsnelheid zijn dus lastig door het elektriciteitsnet op te vangen.

Goede voorspellingen voor de windsnelheid en de windrichting zijn belangrijk om het windvermogen van uur tot uur en van dag tot dag in te schatten om netinpassing te optimaliseren. Een veelgenoemd maximum aandeel windenergie is 20% van de jaarproductie van elektriciteit, zoals in Denemarken bijna het geval is. Een kanttekening die daarbij geplaatst moet worden is dat Denemarken zeer goede afspraken heeft met Noorwegen en Zweden met betrekking tot export en import van elektriciteit in periodes van overproductie en onderproductie. Voor een klein land als Denemarken is het mogelijk variaties in de productiecapaciteit op te vangen met buitenlandse handel. Indien windenergie in Europa op grote schaal ingezet zou gaan worden dan moet naast het

⁴⁶ Durchführung von Machbarkeitsstudien bezüglich der Energieversorgung in Europa bis 2100, H. Weber et. al, Universität Rostock, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung

geïnstalleerde windvermogen opslagcapaciteit voor elektrische energie en/of een voldoende hoeveelheid reservevermogen zijn geïnstalleerd voor windstille dagen. Deze extra capaciteit leidt natuurlijk weer tot extra investeringskosten.

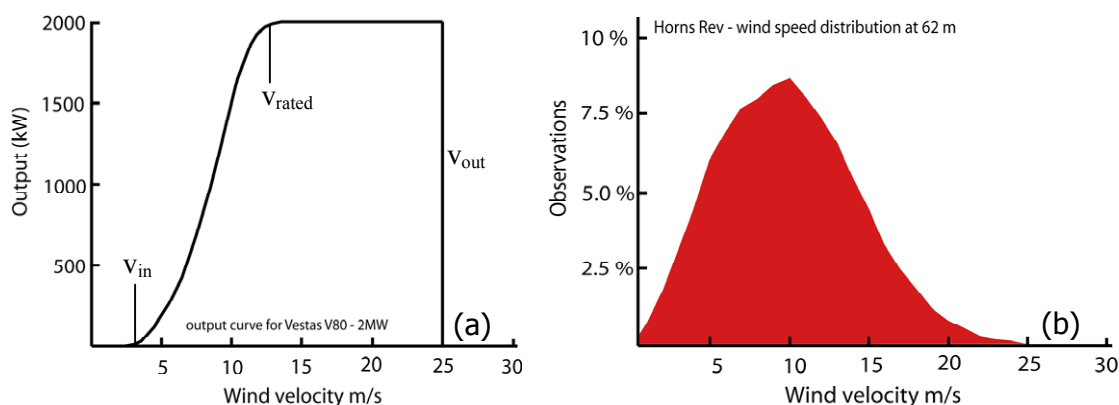
Om windenergie onbeperkt inzetbaar te maken zijn goedkope manieren van energieopslag noodzakelijk. Momenteel zijn de kosten daarvan nog te hoog (zie hoofdstuk 6.1 voor energieopslag en voor de geografische beperkingen aan opslag via opgepompt water in West Europa.)

Productie van windenergie

Voor productie van windenergie zijn zowel de karakteristiek van de gebruikte windmolens als de lokale windverdeling bepalend voor het uiteindelijk opgewekte vermogen. Het windvermogen P_w is gegeven met:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \quad [\text{Watt}] \quad (3.1-1)$$

Hierin is ρ de dichtheid van lucht, v de windsnelheid en A de bestreken oppervlakte van de wieken. Belangrijk aan deze formule is dat het vermogen van de wind met de derde macht van de windsnelheid toeneemt, wat betekent dat lage windsnelheden geen relevant vermogen opleveren. Figuur 3.1.4 (a) laat het vermogensverloop zien voor de windmolens bij Horns Rev. Daarnaast laat figuur 3.1.4 (b) de windsnelheidsverdeling zien voor deze locatie op de hoogte van 62 m, met een gemiddelde windsnelheid van 9.7 m/s. Deze twee curves samen geven een schatting van het te verwachten opgewekte vermogen van het Horns Rev windpark. De jaarproductie is 600 miljoen kWh, tegen een gemiddeld vermogen van 0.85 MW per molen (2 MW in de piek.) De belastingsfactor van dit windpark is $0.85/2$, dus 43%. De gemiddelde Europese belastingsfactor is 24%.



Figuur 3.1.4 (a) Windvermogen voor de Horns Rev molens als functie van de windsnelheid. (b) Windsnelheidsverdeling voor de Horns Rev zee locatie. De gemiddelde windsnelheid op ashoogte is 9.7 m/s.

Potentieel

Denemarken steekt met haar 18.5% aandeel windenergie in de elektriciteitsproductie met kop en schouders boven de rest van Europa uit. Is het realistisch om voor heel Europa een soortgelijk aandeel te verwachten?

De vereniging van Europese windenergie fabrikanten, de Europese Wind Energie Associatie (EWEA), heeft doelstellingen voor Europa (EU-15) opgesteld van 75 GW wind in 2010 en 180 GW in 2020⁴⁷. Dit zou 5.5% en 12.1% van de elektriciteitsconsumptie van EU 15 in 2010 respectievelijk 2020 dekken. De EWEA projectie schat het aandeel van wind op land in 2010 (65 GW) groter in dan wind op zee (10 GW). In 2020 zal die verhouding meer gelijk getrokken zijn met een verwachting van 110 GW op land en 70 GW op zee. In een andere publicatie⁴⁸ ("Wind force 12") maakt zij zelfs projecties voor de gehele wereld met 12% in 2020 en 20% in 2040.

In dit "Wind force 12" geeft de EWEA ook het praktisch potentieel voor wind in Europa aan (EU-15 + Noorwegen.) Het potentieel op land dat planologisch haalbaar is, wordt op zo'n 315 GW (630 TWh/jaar) geschat, Tabel 3.1.2. Volgens bovenstaande voorspellingen zou dat potentieel dus in 2020 voor de helft benut moeten zijn. Voor wind op zee ligt volgens het rapport het potentieel op 900 GW waarvan 90 GW (310 TWh/jaar) praktisch economisch haalbaar is vanwege restricties i.v.m. waterdiepte, horizonvervuiling vanaf de kust en hoge kosten voor lange kabels naar het elektriciteitsnet.

ECN heeft in een recente publicaties⁴⁹ een inventarisatie gemaakt van de lopende plannen voor offshore windenergie. De uitkomst was dat er in 2003 zo'n 279 MW aan offshore wind is geïnstalleerd in Europa, waarvan 233 MW in Denemarken, 19 MW in Nederland (Lely en Dronten in het ijsselmeer), 23 MW in Zweden en 4 MW in Engeland. De studie maakt een korte termijn projectie voor 2006 van 3.2 à 3.4 GW en een lange termijn projectie van 25 GW voor offshore wind. Deze projecties zijn gebaseerd op, (nog) niet goedgekeurde, plannen voor parken in zee. Als belangrijkste struikelblokken voor de daadwerkelijke realisatie voor deze projecten wordt in een tweede ECN studie⁵⁰ aangehaald dat het huidige beleid van de EU-15 landen niet afdoende is. Vooral in Duitsland is de steun voor offshore windenergie te laag⁵¹. Meer overheidssteun en consistent beleid zijn noodzakelijk. Eveneens wordt in beide ECN studies de vergunningverstrekking als struikelblok aangegeven. Een economisch model laat zien dat bij voldoende steun een totaal van 5.5 GW aan offshore wind haalbaar is in 2010, wat onder de EWEA schatting ligt.

Het Nederlandse ministerie van Economische Zaken (EZ) heeft voor 2020 doelen gesteld van 1.5 GW op land en 6 GW wind op zee. Deze getallen zijn duidelijk niet beperkt door praktische potentieel in Nederland zoals aangegeven in Tabel 3.1.2. Op jaarbasis zouden de EZ doelen respectievelijk 2.6 TWh en 21 TWh opleveren, uitgaande van een capaciteitsfactor van 20% op land en 40% op zee. Bij gelijkblijvend gebruik zou dit 20% van de Nederlandse elektriciteitsbehoefte kunnen dekken.

Twee lopende projecten, near-shore NoordzeeWind project (Nuon/Shell) van 99MW bij Egmond aan Zee en het offshore Q7-WP project van 120 MW, hebben vertraging opgelopen bij de vergunningprocedure waardoor de bouw een aantal jaren is vertraagd.

⁴⁷ EWEA: <http://www.ewea.org/03publications/75MW.htm>

⁴⁸ EWEA: <http://www.ewea.org/03publications/WindForce12.htm>

⁴⁹ Offshore wind power developments; An overview of realisations and planned projects (ECN-C-03-058), L.Beurskens et.al

⁵⁰ Large scale offshore wind energy in the north sea: A technology and policy perspective (ECN-RX-03-048) M. de Noord et. al

⁵¹ Er wordt in de studie gesteld dat een terugleververgoeding van 9 à 10 €/ct/kWh noodzakelijk is om de doelstellingen van 1.5GW op zee in Duitsland in 2010 te halen.

Willen de EZ-doelstellingen in Nederland gehaald worden dan zal de verstrekking van vergunningen een stuk soepeler moeten worden

Tabel 3.1.2: technisch potentieel voor windenergie op land in Europa, EU-15 + Noorwegen (EWEA). Er is gekeken naar open landoppervlakte met gemiddelde windsnelheden boven de 5.5 m/s. In de tabel wordt ook aangegeven hoeveel geïnstalleerd mag worden om onder de grens van 20% van de totale elektriciteitsproductie te blijven. Voor Nederland komt de studie op een maximum van 3.5 GW piekvermogen voor wind op land (nu 0.5 GW). EZ geeft als indicatie een maximum van 1.5 GW op land in Nederland.

Country	Total electricity consumption, (TWh/year ¹)	Technical wind potential TWh/year, (GW capacity)	Up to 20% of consumption from wind,(TWh/year)	Surplus wind ,over 20% consumption (TWh/year)
Austria	60	3 (1.5)	3	–
Belgium	82	5 (2.5)	5	–
Denmark	31	10 (4.5)	6.2	3.8
Finland	66	7 (3.5)	7	–
France	491	85 (42.5)	85	–
Germany	534	24 (12)	24	–
Great Britain	379	114 (57)	75.8	38.2
Greece	41	44 (22)	8.2	(?) ²
Ireland	17	44 (22)	3.4	40.6
Italy	207	69 (34.5)	41.4	27.6
Luxembourg	1	0	–	–
Holland	89	7 (3.5)	7	–
Portugal	32	15 (7.5)	6.4	8.6
Spain	178	86 (43)	35.6	50.4
Sweden	176	41 (20.5)	35.2	22.8
Norway	116	76 (38)	23.2	–
Total	2,500	630 (315)	366.4	244.8

Source: BTM Consult; technical wind potential from University of Utrecht Study Wijk and Coelingh, 1993

¹ Electricity consumption is based on OECD/IEA figures for 1989, extended by 3% per annum to 1995. The IEA "World Energy Outlook" (1998) records a total consumption for OECD-Europe in 1995 of 2,678 TWh.

² Greece has an excess potential, but with resources scattered over many islands is unlikely to be an exporter for some time.

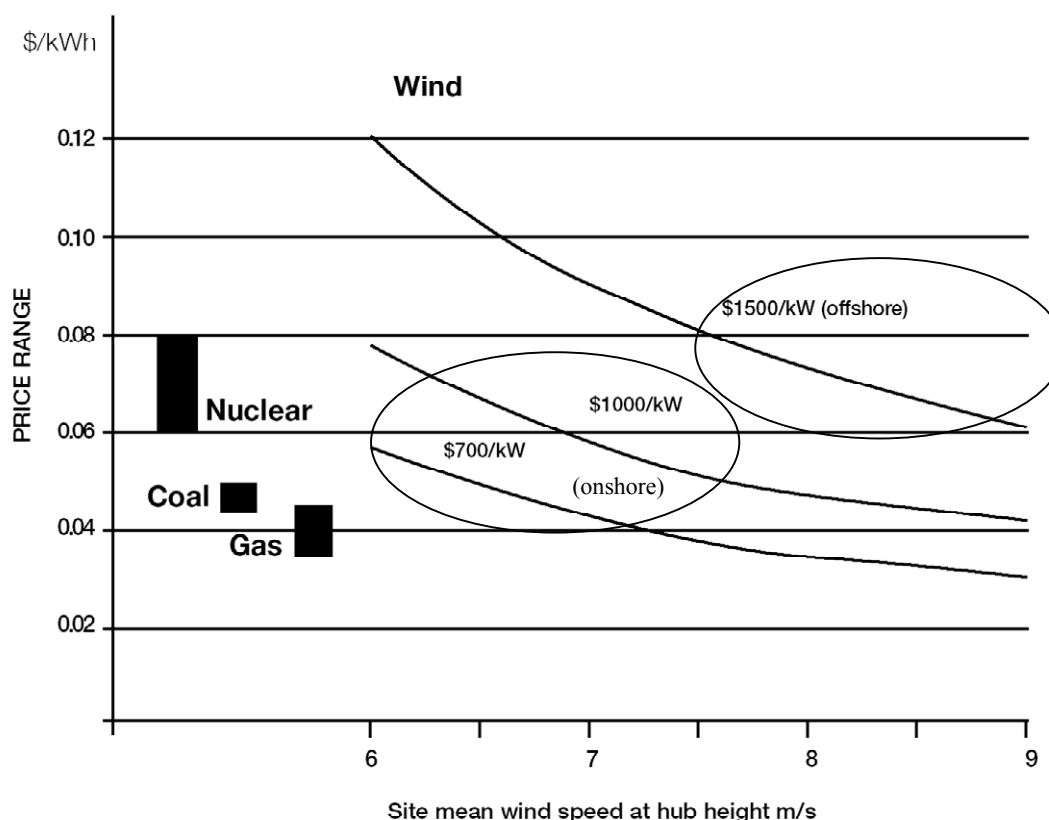
Voor gebruik in hoofdstuk 6.1 leiden wij uit deze tabel de gegevens af voor maximale windenergie op land voor Nederland en de 15 landen van de EU-15. Dat laatste vindt men uit de tabel minus Noorwegen.⁵² Voor Nederland vindt men dan 25.2 PJ en voor de EU-15 vindt men ongeveer 2000 PJ = 2 EJ.

Windenergie financieel

De kosten van elektriciteit per kWh worden door de EWEA in haar "Wind Force 12" vergeleken met die van conventionele energiebronnen zoals gas, kolen en nucleair in figuur 3.1.5. De investeringskosten voor wind op land liggen nu rond de €1000,-/kWpiek. Verwacht wordt dat deze kosten nog verder zullen dalen tot rond de €700,-/kWpiek. Tegen deze lagere prijs kan windenergie direct concurreren met conventionele elektriciteitsbronnen zoals gas en kolen indien de lokale gemiddelde windsnelheid boven de 6 m/s ligt. Op zee is de windsnelheid altijd hoger dan land, maar de investeringskosten op zee zijn ook significant hoger dan voor windmolens op land. Het Horns Rev windpark heeft een investeringsprijs van €1500,-/ kWpiek. Dit park ligt in de Oostzee waar gunstige locaties te vinden zijn., d.w.z. ondiepe locaties met een stabiele ondergrond. Tegen deze prijs kan wind op zee concurreren bij windsnelheden boven de

⁵² De afkortingen PJ en EJ zijn opgenomen op de achterkant van de titelpagina.

9 m/s, wat Horns Rev dus concurrerend maakt. Nederlandse locaties op zee zullen in de Noordzee geplaatst worden. Het geplande park bij Egmond aan Zee van in totaal 100 MW met 36 molens van 2.75 MWpiek elk, heeft investeringskosten van rond de €2000,-/kWpiek. Het Nederlandse offshore Q7-WP project van 120 MW heeft investeringskosten van rond de 2200€/kWpiek. Deze kosten zijn hoger dan in Denemarken omdat aan de Nederlandse kust in diepere wateren gewerkt moet worden met minder stabiele ondergrond. De verwachting voor Nederlandse zeelocaties is dan ook dat de kosten relatief hoog zullen blijven in vergelijking met windparken op land.



Figuur 3.1.5: Kosten van elektriciteitsopwekking met behulp van wind vergeleken met elektriciteit uit kolen, gas en kernsplijting. De krommes tonen de verschillende kosten die behoren bij investeringskosten van \$700,-/kWpiek, \$1000,-/kWpiek en \$1500,-/kWpiek. Investeringskosten voor parken op land liggen nu in de buurt van \$1000,-/kWpiek, terwijl investeringskosten op zee rond de \$1500-2200/kWpiek liggen.⁵³

Vanaf 1 juli 2004 zijn de subsidies op windenergie in Nederland 6.4 €/kWh op land en 8.3 €/kWh op zee.^{54,55} Uitgaande van de door EZ nagestreefde windproductie in 2020 van 2.6 TWh op land en 21 TWh op zee en aangenomen dat de huidige subsidie voor windenergie wordt gehandhaafd, kan uitgerekend worden dat de kosten voor de samenleving 1.9 Miljard Euro per jaar zullen zijn. In termen van bespaarde CO₂-emissies

⁵³ Bronnen: zie de beide aangehaalde ECN rapporten van de Noord en van Beurskens.

⁵⁴ MEP= subsidie onder de Milieukwaliteit elektriciteitsproductie (4.9 €/kWh en 6.8 €/kWh voor respectievelijk wind op land en zee)

⁵⁵ REB= Regulerende energie belasting. Duurzame energiebronnen zoals windenergie krijgen een gedeeltelijke vrijstelling op deze belasting van 2.97 €/kWh tot 1 juli 2004 en 1.5 €/kWh vanaf die datum.

komen die kosten worden berekend als 100 € per bespaarde ton CO₂ voor wind op land en 140 € per bespaarde ton CO₂ voor wind op zee.⁵⁶

Als de lijn doorgetrokken wordt naar de streefgetallen voor de EU-15 kan geschat worden dat subsidies voor windenergie in 2010 op het Nederlandse niveau 10 Miljard Euro per jaar zullen vergen. In 2020 zal dit opgelopen zijn tot 33 Miljard Euro. Het is niet waarschijnlijk dat dit subsidieniveau voor zo'n lange tijd gehandhaafd zal blijven, omdat de kosten te hoog zullen oplopen. Tegelijkertijd zegt het ECN rapport⁵⁷ dat in ieder geval deze subsidie moet blijven tot 2010 willen de doelstellingen in dat jaar gehaald worden. Uiteindelijk zal een economische afweging gemaakt moeten worden, en zullen de kosten per bespaarde ton CO₂ vergeleken moeten worden met andere opties.

Punten van aandacht.

Belangrijk punt van aandacht bij windenergie is dat de vergunningverstrekking (zowel op land als op zee) zeer moeizaam verloopt. Windparken op land krijgen veel protesten van omwonenden die de molens niet mooi vinden of bang zijn dat ze teveel lawaai maken. Ook krijgen windparken protesten vanuit de milieubeweging omdat ze een sta in de weg zouden zijn voor vogeltrek. Milieueffectrapportages laten zien dat, indien de molens buiten de vogeltrekroutes worden geplaatst, de vogelsterfte erg laag is vergeleken met vogelsterfte door verkeer en hoogspanningsmasten.

Voor windparken op zee is de betrouwbaarheid van de windmolens een aandachtspunt. Windmolens op zee krijgen het veel zwaarder te verduren dan windmolens op land, vanwege de extremere weercondities. Omdat wind op zee pas de afgelopen jaren op grote schaal toegepast wordt, is de gewenste betrouwbaarheid nog niet gehaald. Wat de werkelijke betrouwbaarheid van windparken op zee is, zal de komende jaren blijken. Het is noodzakelijk onderhoud te optimaliseren en uitval te minimaliseren. Het blijft een moeilijkheid, dat reparatie van een defecte molen op zee soms onmogelijk is.

Technologische ontwikkelingen

De kardinale vraag is of nieuwe technologie de prestatie van windparken kan verbeteren, dan wel de concurrentiepositie versterken. Wij kijken naar 2 aspecten: de huidige en geschatte opbrengst per km² en verbeterde ontwerpen.

opbrengst per km²

Men kan laten zien⁵⁸ dat voor een rechthoekig windpark met turbines met een bepaalde ashoogte de opbrengst per km² aan een maximum gebonden is. De reden is dat de wind de luwte achter de molens moet aanvullen. Het maximum stijgt als men hogere molens neerzet. Dat is toe te schrijven aan de hogere windsnelheid op grotere hoogte. De windsnelheid neemt sterk toe tussen 10 en 100 meter hoogte en blijft wel daarna wel toenemen, maar veel minder sterk. De constructie- en onderhoudskosten blijven sterk toenemen met de hoogte, dus men kan een optimum verwachten in de buurt van een hoogte van 100 meter, de hoogte van de Utrechtse Domtoren.

⁵⁶ De EWEA gebruikt als gemiddelde emissie besparing 0.6 kg CO₂ /kWh.

⁵⁷ de Noord, a.w.

⁵⁸ Egbert Boeker, berekening op aanvraag beschikbaar

Laten wij thans kijken naar schattingen van de windopbrengst per km². Soms hanteert men als vuistregel een maximaal haalbare opbrengst op land van 30 GWhe per jaar en als gemiddelde 20 GWhe per jaar. Dat wordt respectievelijk 0.1 PJe per km² per jaar of 0.067 PJe per km² per jaar. Op zee zou de opbrengst 1.5 keer zo groot kunnen zijn, dus resp. 0.15 PJe per km² per jaar of 0.1 PJe per km² per jaar. De auteur van hoofdstuk 6.1 vindt het veiliger 2/3 van deze getallen te nemen (zie hoofdstuk 6.1). Het verschil hangt samen met een inschatting van de kosten van bekabeling en elektrotechniek tussen de turbines (die toeneemt met de afstand) en de opbrengst (die ook toeneemt met de onderlinge afstand maar op een andere manier).

betere ontwerpen

In figuur 3.1.4 ziet men dat vanaf een windsnelheid van, in dat geval, 12 m/s de opbrengst horizontaal begint te lopen. Dat is karakteristiek voor alle huidige types windturbines. Bij die snelheid, in de figuur aangegeven als v_{rated} , is de opbrengst dichtbij het theoretische maximum⁵⁹, op het oog zo'n 80% van die waarde. Bij hogere windsnelheden blijft de opbrengst constant en wordt daarmee steeds lager dan het theoretisch maximum.

Het is denkbaar dat men ook bij de hogere windsnelheden, die minder voorkomen (figuur 3.1.4 (b)), opbrengsten dicht bij het maximum kan bereiken. De 2 vrijheidsgraden die er nog zijn: hoogte en fractie van theoretisch maximum, zullen –naar ruwe schatting – een 50 % extra opbrengst kunnen bereiken. Voor 2050 komt hoofdstuk 6.1 daarom op 0.10 PJe per km² per jaar op zee of 0.07 PJe per km² per jaar op land – de dikwijls gebruikte getallen.

Samenvatting en conclusies

uitstoot

geen uitstoot, alleen bij productie windmolens (en sloop)

implementatie

Het ruimtebeslag moet niet verward worden met horizonvervuiling: bij windmolens is een dubbel gebruik (landbouw) mogelijk van de grond⁶⁰. Een windpark neemt effectief niet veel meer ruimte in dan een fossiel gestookte centrale. Windmolens tasten de horizon wel aan, overigens niet meer dan hoogspanningsmasten.

Blijkens onderzoek ervaren de meeste mensen windenergie positief (ze hebben meestal geen probleem met een windmolen in hun gemeente; het aantal mensen dat er positief over denkt wordt groter als er eenmaal een windpark gebouwd is); een kleine maar tamelijk luidruchtige minderheid heeft een aversie tegen windmolens. Bestuurders gaan dikwijls overstag tegen bezwaarmakers, omdat mensen die het met het plaatsen van de molens eens zijn niets van zich laten horen.

⁵⁹ Dat maximum heet de Betz limiet. Die wordt bepaald door de wetten van behoud van massa en van energie. Daaraan is niet te ontkomen.

⁶⁰ Voor eenvoudige windmolens is het voldoende een ruimte van 10 bij 10 meter om de turbine af te zetten en verder te zorgen voor een eenvoudige toevoerweg voor het onderhoud.

voorzieningszekerheid

Bij windenergie heb je altijd ofwel een vorm van opslag⁶¹ ofwel reservecapaciteit nodig wil je altijd elektriciteit kunnen leveren; het waait nu eenmaal niet altijd even hard.

Waterkracht en biomassa centrales kunnen duurzame opslagcapaciteit of reserve vermogen geven. Ook snel in te schakelen gasturbines zijn een goede optie als reserve. De windturbine is nog niet helemaal uitontwikkeld, maar in principe wel een heel simpel apparaat en daarmee technologisch eenvoudig.

De inpasbaarheid van windturbines is veel groter dan vaak gedacht wordt en moet niet verward worden met weersafhankelijkheid. Idealiter zou men zo veel mogelijk windenergie moeten benutten als lokaal mogelijk is en het andere opgestelde vermogen daaraan aanpassen om tot de gewenste voorzieningszekerheid te komen.

potentieel

De mogelijkheden zijn groot, vergelijkbaar met de inzet van waterkracht. Waterkracht heeft als nadeel dat het alleen in gebieden met hoogteverschillen toegepast kan worden. Wind kan worden toegepast in windrijke gebieden. Beiden hebben zo een beperking in locatie. Windrijke gebieden zijn wel uitgestrekter dan gebieden met voldoende hoogteverschillen. Waterkracht heeft echter de mogelijkheid van energieopslag in zich, waardoor het makkelijker grootschalig ingezet kan worden. Het is evident dat het potentieel van windenergie alleen benut kan worden met stevige overheidssteun en een veel soepeler regelgeving.

duurzaamheid

Iedereen verwacht dat het over 200 jaar nog wel waait.

ontwikkelingslanden

Windenergie is heel geschikt om in te zetten in gebieden met een snelgroeiende behoefte aan elektriciteit: de bouwtijd van een windturbine is erg kort en men kan makkelijk opschalen. Er moet dan natuurlijk wel sprake zijn van combinatie met ander opwekvermogen of de wisselende productie moet aanvaardbaar zijn, zoals voor waterpompen of drinkwaterwinning uit zeewater, of er is een vorm van opslag zoals via koppeling aan waterkracht.

Toepassing in de buurt van stedelijke gebieden heeft de voorkeur vanwege de elders ontbrekende infrastructuur (wegen, kranen etc.). Bij gebieden ver van het elektriciteitsnet moet men voor kleine molens kiezen

gelijkheid

Windenergie zal niet zelfstandig de oplossing zijn (zoals geen enkele energiebron), maar wel een belangrijk deel van de oplossing.

evaluatie

Lokale windcondities verschillen sterk, maar worden kleiner bij hogere masten. Hogere masten zijn niet goed toepasbaar in gebieden zonder goede infrastructuur. Windenergie op zee is erg veel duurder dan op het land; het prijsverschil zal blijven tenzij grond overal ter wereld erg duur wordt.

⁶¹ Elektriciteit uit wind kan worden gebruikt om een warmtepomp aan te drijven, die vervolgens een woning of gebouw verwarmt. Omdat een gebouw slechts langzaam afkoelt kunnen korte windarme perioden zo worden overbrugd – in feite ook een vorm van opslag.

3.2 Zonne warmte door Teun Bokhoven

Er zijn diverse vormen van zonne-energie die worden toegepast in de energie-huishouding. Naast photo-voltaïsche zonne-energie voor elektriciteitsopwekking en passieve zonne-energie, vormt thermische zonne-energie een van de opties die een groot potentieel kan dekken in de energie voorziening.

Thermische zonne-energie omvat de technologie op basis waarvan via een actief systeem lichtinstraling wordt omgezet in bruikbare warmte of koude. De belangrijkste toepassingen zijn:

- Woningbouw:
 - Tapwatervoorziening
 - Ruimteverwarming
 - Koeling (nog in ontwikkelstadium)
- Utiliteitsector / industrie
 - Warmwater productie
 - Ruimteverwarming
 - Koeling
 - Proces warmte (o.a. voor droging)
- Overige:
 - Ontzilting

Stand van zaken

Tabel 3.2-1 Belangrijkste applicaties van thermische zonne-energie

Applicatie	Systeem	Opmerkingen
Tapwaterbereiding - huishoudelijk	Standaard zonneboilers van ca. 3-6 m ² collector en 100-300 liter water (gemiddeld in EU)	De NL zonneboilers zijn relatief klein (2,5-3 m ² en ca. 100 liter opslag) en zijn geoptimaliseerd op een jaarlijkse dekkingsbijdrage van ca. 50%.
Tapwaterbereiding – kleine utiliteitsbouw	Zonneboiler installaties die zijn geoptimaliseerd op een economische dekking	Gemiddelde jaarlijkse dekking momenteel ca. 25-50%
Huishoudelijke combisystemen	Type van vergrote zonneboilers waarin ook een deel van de ruimteverwarming wordt gedekt	Komen het beste tot uitdrukking in combinatie met laag-temperatuur verwarming. Neemt momenteel heel sterk toe in Duitstalige landen en Scandinavië (ook in combinatie met kleinschalige bio-energie).
Industriële proceswarmte	Allerlei industriële processen waarvoor warmte noodzakelijk is. Grootste (economisch) toepassingsgebied (80%) op temperatuurniveau tot ca. 80 ° C.	Vb in Nederland: 2400 m ² collectoren en 100 m ³ water opslag bij de snoepjes fabriek van van Melle in Breda; tbv proceswater. Dekt ca. 20% van de proceswarmte.
Droogprocessen	Veelal eenvoudige luchtcollectoren, die worden ingezet om de droog /- of ventilatie lucht (voor) te verwarmen.	Veel toepassing in buitenland (3 ^e wereld) tbv hout, tabak, rijst etc.
Koeling	Zonnewarmte voorverwarming tbv koelingsprocessen zoals dessicant cooling, absorbtie koeling, adsorptie koeling. Werk temperaturen collector van 80-150 °C	Groeiend aantal toepassingen. Voorlopig nog sterk gericht op utiliteit-sector. Nog ontwikkeling noodzakelijk tbv woningbouw sector.
Zwembadverwarming	Onafgedekte collector systemen	Een inmiddels veel toegepaste en uiterst rendabele toepassing.

De systemen die worden gebruikt zijn uiteraard afhankelijk van de applicatie. De belangrijkste applicaties zijn aangegeven in tabel 3.2-1.

Per jaar worden momenteel ca. 9 miljoen m² thermische zonnecollectoren geïnstalleerd. De Europese markt (inclusief Turkije en Israël) vormt momenteel 25% van de mondiale toepassing. Het grootste aantal m² (65% van de wereldmarkt) wordt momenteel in China geplaatst.

De gemiddelde groei in Europa over de laatste 10 jaar bedraagt 13,6% per jaar. Momenteel wordt er ca. 0,5 Mtoe (ca 20 PJ) aan thermische zonne energie geproduceerd. Dat is ca. 0,15% van het huidige EU warmtegebruik. Het technisch economisch perspectief wordt geschat op ca. 20% van de totale warmte behoefte⁶². De situatie in de verschillende EU landen per einde 2003 is aangegeven in tabel 3.2-2:

Tabel 3.2-2: EU markt voor thermische zonne-energie ⁶³

	2003		
	Cumm.geplaatst in 1000 m ² .	Geplaatst in 2003 in m ²	Groei t.o.v 2002
AT	1.921,6	166920	9%
BE	31,8	5000	1%
CH	224,9	26222	2%
DE	4.898,0	750000	39%
DK	299,9	19000	46%
ES	341,6	70000	6%
FI	10,0	2000	80%
FR	237,4	38.900	44%
GR	2.779,2	161000	6%
IE	4,4	650	30%
IT	398,8	50000	11%
NL	265,6	27686	-16,4%
No	13,5	2000	0%
PT	160,6	6000	9%
SE	173,6	19255	26%
UK	149,9	22000	26%
EU 16	1.1910,8	1.366.633	25%

De markt in Nederland loopt momenteel terug, zoals blijkt uit Figuur 3.2-1. Hoewel de groei in Nederland de afgelopen 10 jaar gemiddeld de EU trend heeft kunnen volgen (13,8%) is in 2003 een kentering ontstaan door de wijzigingen in het subsidie regiem (EPR regeling) en een stagnatie in de verlaging van de EPC-waarde (energie prestatie coëfficiënt) voor nieuwbouw woningen⁶⁴.

⁶² bron: ESTIF, Sun in Action II, EC-DGTREN

⁶³ bronnen: ESTIF, Holland Solar, Solair Systems

⁶⁴ Bij een lagere energie prestatie coefficient is de prestatie hoger !

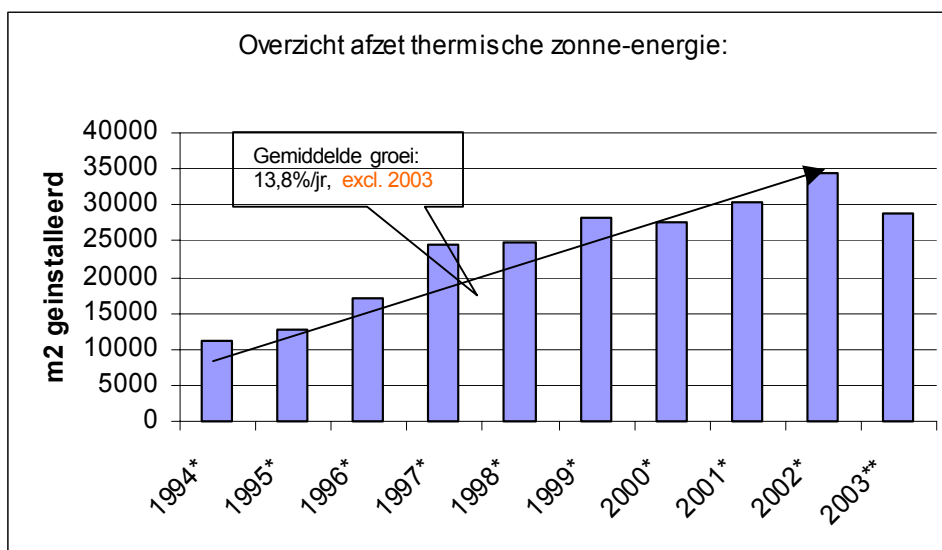


Fig 3.2-1 Afzet thermische zonne-energie in Nederland⁶⁵

De Nederlandse markt wordt vooral gekenmerkt door de plaatsing van zonneboilers (warm tapwater – zowel huishoudelijk als voor grote systemen). Dit is aangegeven in tabel 3.2-3. In de toekomst zullen daar ook steeds meer zogenaamde combi-systemen aan worden toegevoegd (combinatie ruimteverwarming en tapwater). Het merendeel van de systemen in de woningbouw wordt in de nieuwbouwsector gerealiseerd. Het effect van een verlaging van de EPC-waarde (Energie Prestatie Coëfficiënt) is daardoor ook van belang voor de verdere groei in deze sector. Een gemiddelde zonneboiler vermindert, bij de normen van 2006, ca. 20-25% van de energie consumptie.

Tabel 3.2-3: Afzet thermische zonne-energie in Nederland⁶⁶

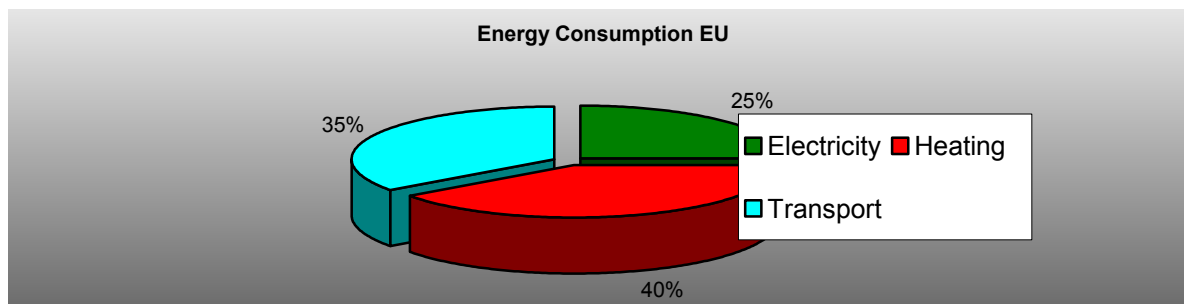
jaar	Aantal Zonneboilers	m ² - In zonneb.	Grote systemen m ²	Totaal m ² In jaar	% verschil t.o.v. vorig jaar	export
1994*	2505	8370	2688	11058	n.a.	
1995*	3375	11184	1522	12706	14,9%	
1996*	4495	14655	2262	16917	33,1%	2294
1997*	7917	21765	2580	24345	43,9%	2703
1998*	7612	20497	4340	24837	2,0%	2047
1999*	8565	25735	2386	28121	13,2%	1124
2000*	7969	24677	2984	27661	-1,6%	2009
2001*	8750	27169	3368	30537	10,4%	2850
2002*	10035	28344	5973	34317	12,4%	2933
2003**	8385	23450	4236	27686	-16,4%	3000

Schattingen

Binnen de EU-15 wordt ca. 40% van het energiegebruik aangewend voor verwarmingsdoeleinden in de gebouwde omgeving en de industrie, terwijl 1/3 van het totale energiegebruik zijn toepassing vindt in de gebouwde omgeving (ca. 10% elektriciteit en ca. 25% verwarming). Dit is aangegeven in figuur 3.2-2.

⁶⁵ bron: Novem en Holland Solar

⁶⁶ bron: Novem, CBS en Holland Solar



Figuur 3.2-2. Energieconsumptie in de EU naar toepassing

Recente schattingen⁶⁷ van het technisch-economisch potentieel van thermische zonne-energie gaan uit van ca. 6% van het totale EU energie gebruik op middellange termijn. Dit komt neer op ca. 1,4 miljard m² thermische zonnecollectoren die 682 TWh (58,7 Mtoe of 2.5 EJ) thermische energie produceren. Een dergelijk scenario is gebaseerd op een structurele groei van deze sector welke overeenkomt met de groeipercentages van wind-energie (30% op wereldschaal), over de afgelopen 10 jaar. Dit impliceert dus een duidelijke versnelling van de toepassing. Een dergelijke versnelling kan slechts ontstaan indien de regelgeving in de EU ten aanzien van het gebruik van duurzame energie in de gebouwde omgeving, aanzienlijk wordt aangescherpt (vergelijkbaar met regelgeving in Israël, Barcelona en andere regio's).

Op langere termijn (na 2020) wordt een technisch - economisch potentieel voorzien van 10-15% het totale EU energie gebruik, (dit vormt ca. 30-50% van het totale gebruik in de sector "verwarming"), indien er technische oplossingen beschikbaar komen voor het tijdsafhankelijk opslaan van energie met een laag volume (factor 10 kleiner dan water). Internationaal wordt er momenteel veel onderzoek gericht naar dit soort systemen. Hierbij wordt vooral gewerkt aan fase-overgang materialen (PCM- Phase Change Materials) en thermo-chemische opslag. Nu al zijn dit soort opslag systemen beschikbaar, waarbij de compactheid nog verder kan en zal worden verbeterd (dit is het primaire onderwerp van de research).

Karakteristieke eigenschappen

Thermische zonne-energie is uiteraard afhankelijk van het directe aanbod van (zon) licht. Dit impliceert gevoeligheid voor het seizoen, de geografische ligging en de periode van de dag. De meeste thermische zonne-energie systemen hebben een opslagsysteem om deze gevoeligheid te reduceren. In Noord-Europa dekt een gemiddeld zonneboiler-systeem met 2,5 à 3 m² collectoroppervlak en 100 liter wateropslag 50% van de tapwater behoefte op jaarbasis. Doordat de behoefte aan tapwater het gehele jaar constant blijft en de benodigde oppervlakte per huishouden gescheiden is (ook voor de toepassing in hoogbouw) wordt de zonneboiler het meest toegepast, want de geproduceerde warmte kan immers het hele jaar worden benut. Daarnaast worden steeds meer zogenaamde "combi" systemen geïntroduceerd die zowel warm tapwater leveren als ook een bijdrage aan de ruimte verwarming.

Onderzoek naar tijdsafhankelijke opslagsystemen op basis van fysisch/ chemische opslag methoden vormen momenteel prioriteit waarmee het toepassingsgebied voor thermische toepassingen aanzienlijk kan worden vergroot.

⁶⁷ Sun in action II- EU/ESTIF, april 2003

In tegenstelling tot veel duurzame energie opties zoals grootschalige windparken en bio-energie worden thermische zonne-energie systemen decentraal toegepast. Dat wil zeggen dat de systemen energie produceren op het punt van gebruik. Er wordt in de meeste gevallen dus geen gebruik gemaakt van de energie distributie structuur (zoals bij gas en elektra). Dit heeft gevolgen voor de implementatie en de actoren die deze technologie benutten. Er wordt geen verhandelbaar product geleverd zoals elektronen of m³ aardgas, waardoor de betrokkenheid van energiebedrijven anders is dan bij wind of bio-energie. Pas indien er een waardering wordt vastgesteld voor de reductie in CO₂ uitstoot door middel van bijvoorbeeld een groencertificaat, kan er een verhandelbare eenheid ontstaan. Een goed voorbeeld daarvan wordt gegeven door Australië. Daar worden voor iedere zonneboiler een aantal verhandelbare groencertificaten verstrekt.

De jaarlijkse CO₂ reductie per m² collector varieert tussen 100 en 265 kg / m², afhankelijk van de vervangende voorziening (gas of elektriciteit). Bij een marktpenetratie van ca. 1 m² thermische collector per inwoner (bijna de huidige situatie in Oostenrijk) is het potentieel van de CO₂ reductie in de EU ca. 50 Mt CO₂/jaar. Het technisch potentieel ligt nog een factor 3 hoger.

De benodigde energie voor de productie van de hardware van de zonneboiler wordt gemiddeld binnen 1 jaar via de energie opwekking van het systeem terugverdiend, terwijl de technische levensduur van het systeem in Nederland 20 à 25 jaar bedraagt.

De kosten voor een typische thermische zonne-energie installatie bedragen momenteel per m² tussen € 150 (voor onafgedekte zwembad collectoren) en € 400 à € 500 (voor tapwater systemen). In Nederland kost een geïnstalleerde zonneboiler gemiddeld € 1750,- per systeem (inclusief BTW, exclusief eventuele subsidies).

Samenvatting en conclusies

Uitstoot

Toepassing van zonnewarmte leidt tot een minimale uitstoot. Het elektriciteitsgebruik ten behoeve van het bedienen van een pomp en de elektronische regeling bedraagt ca. 20 Kwh / m² per jaar. De benodigde elektriciteit kan eenvoudig worden opgewekt door middel van PV (heeft voordelen omdat de zon gelijktijdig de warmwaterinstallatie en de PV installatie bestraalt). Dit wordt echter nog slechts sporadisch toegepast als gevolg van de nog hoge kosten van de PV, maar zal binnen een aantal jaren duidelijk gaan toenemen. Verder is er geen uitstoot, behalve tijdens de productie van de hardware (energetische terugverdientijd: < 1 jaar)

Implementatie

De toepassing van zonnewarmte, met name in de vorm van zonneboilers, is technisch weinig gecompliceerd. In nagenoeg alle gebouwde omgevingen wordt de zonneboiler zonder enige vergunningsprocedure geaccepteerd (met uitzondering van monumenten). In de bestaande woningvoorraad is de marktpenetratie nog gering. Dit ligt niet aan de positieve belangstelling, maar aan de verkrijgbaarheid en de geringe verkoopgerichtheid in de installatiesector. Deze situatie heeft de volle aandacht en aan verbetering wordt hard gewerkt.

Voorzieningszekerheid

Door de koppeling van een zonnecollector aan een opslagvat worden de effecten van een wisselende instraling gedempt. Wat blijft zijn de seizoen wisselingen.

Potentieel

Zowel op EU - als Nederlands niveau wordt het potentieel voor de middenlange termijn (tot 2020) geschat op 6% van de totale energie consumptie. Op langere termijn kan dat hoger worden indien nieuwe opslagtechnologieën zijn geïntroduceerd.

Duurzaamheid

Top-duurzaam

Ontwikkelingslanden

In de ontwikkelingslanden zal het benutten van zonnewarmte een sterke groei doormaken. Op het moment dat de warmtebehoefte stijgt (bijvoorbeeld door behoefte aan warm water) is de toepassing van zonneboilers mogelijk. De technologie is eenvoudig en veelal ook met lokale materialen te produceren. Illustratief is dat de grootse markt momenteel in China is met ca. 6 miljoen m² jaarlijkse productie (65% van de wereld markt).

3.3 Zonne-elektriciteit (PV) door Marc Beurskens

Inleiding

Zonne-elektriciteit wordt in de regel afgekort als PV, foto-voltaisch, omdat men met de fotonen uit zonlicht Volts opwekt. Met fotovoltaische zonnecellen wordt direct elektriciteit opgewekt uit zonlicht. Het gemiddelde zonnevermogen dat op de aarde schijnt is 1500 maal zoveel als het mondiale elektriciteitsverbruik. Dus is het theoretisch potentieel van fotovoltaische zonne-energie voldoende om in de gehele mondiale energievoorziening te voorzien. Momenteel is mondiaal 1Gw piek aan zon PV geïnstalleerd. Daarvan is 70% op het net aangesloten en 30% is vrijstaand.

Autonome systemen staan los van een (bestaand) elektriciteitsnet en maken vaak gebruik van accu's om de elektriciteit op te slaan. Voor rurale elektrificatie is dit soort systemen weliswaar interessant maar door o.a. de kleine elektriciteitsvraag van rurale gebieden en de negatieve bij-effecten van veel accu's zijn deze systemen voor de werkgroep wat minder interessant. Niet-Autonome PV systemen zijn gekoppeld aan het elektriciteitsnet en leveren gedurende de dag de overproductie terug aan het net. Vraagvermindering en een zekere mate van decentrale opwekking door de teruglevering is waar het hier om gaat.

Tabel 3.3.1 efficiëntie van commercieel verkrijgbare en toekomstige zonnecellen ⁶⁸

Technologie	Typische efficiëntie	Maximaal behaalde Efficiëntie in de industrie	Maximaal behaalde Efficiëntie in laboratoria
Enkelkristallijn silicium	12-15%	22.7	24.7
meervoudig kristallijn silicium	11-14%	15.3	19.8
amorf silicium	5-7%	-	12.7
Cadmium Telluride (CdTe)	-	10.5	16
Koper Indium Diselenide (CIS)	-	12.1	18.2

Het theoretisch potentieel voor PV is groot. Praktisch gezien zijn er echter nogal wat haken en ogen. Naast de prijs (momenteel kost zonne-elektriciteit zo'n 1 €/kWh, 30 keer zoveel als fossiele opwekking), is de technologie voor de omzetting van zonne-elektriciteit in voor ons bruikbare elektriciteit niet gemakkelijk. Ook is zonne-elektriciteit relatief ruimte-intensief en is de CO₂ die uitgestoten wordt door het fabriceren van een zonnepaneel nog evenveel als het zonnepaneel in vier jaar gebruik aan CO₂ emissie vermindert (in Noordwest Europa). Deze "CO₂-terugverdientijd" is een essentieel gegeven voor een CO₂ vrije energiebron, maar er zit wel verbetering in: de energierugverdientijd zal de komende tijd naar verwachting dalen tot minder dan 2 jaar⁶⁹. Optimistische schattingen van de EPIA geven aan dat zonne-elektriciteit in 2020 in 1% van de wereldenergievoorziening zou kunnen voorzien. Op de lange termijn kan dat

⁶⁸ Dresdner Kleinwort Wasserstein (2001): *Power generation in the 21st century, part II: renewables gaining ground*. 18 January 2001.

⁶⁹ EPIA, Sept. 2001: Solar Generation – solar electricity for over 1 billion people and 2 million jobs by 2020

aandeel stijgen, maar veel onderzoek is nodig om zonne-elektriciteit zowel op middellange als op lange termijn een rol van betekenis te laten spelen.

Techniek

Momenteel worden de meeste PV cellen gemaakt van silicium. Deze zijn het goedkoopst te produceren. Verschillende productiemethoden van silicium cellen leiden tot verschillende types; enkelkristallijn, meervoudig kristallijn en amorf silicium. Deze cellen verschillen in kostprijs en uiteindelijk rendement (Tabel 3.3.1). Naast silicium als grondstof wordt onderzoek gedaan naar andere types PV zonnecellen. Voorbeelden zijn Galliumarsenide (GaAs) cellen die veel in de ruimtevaart gebruikt worden vanwege hun hoge efficiëntie (20-25%), maar voor aardse toepassingen is de hoge kostprijs een bezwaar. En titaanoxide cellen, die een lage kostprijs met een hoge opbrengst combineren, worden bestudeerd. Helaas zijn titaanoxide cellen erg instabiel en alleen nog maar in een laboratorium gemaakt.

Nieuwe manieren om silicium lagen te groeien, zoals de zogenaamde "thin-film" technologie beginnen tot ontwikkeling te komen. Deze nieuwe technologie reduceert de materiaal consumptie, wat essentieel is voor de kosten reductie als wel als voor de reductie van de benodigde energie bij de productie. Momenteel zijn de hoogwaardig Silicium materiaalkosten nog voor 60% verantwoordelijk voor de uiteindelijk module kosten⁷⁰.

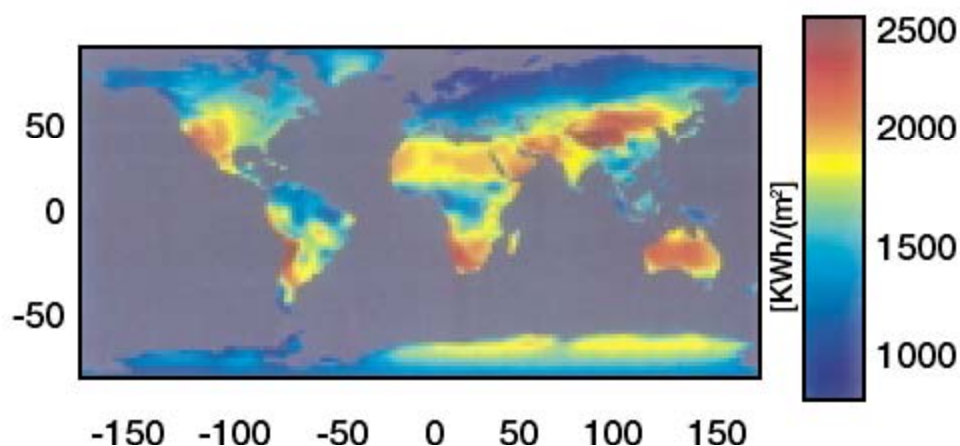
Bijna 65% van het wereldwijde onderzoek aan zonnecellen is gewijd aan deze "thin-film" ontwikkeling. Amorf Silicium is het meest gebruikte basis materiaal voor dit type cellen, maar andere materialen worden ook al gebruikt, en beginnen commercieel aantrekkelijk te worden. Hieronder vallen met name Cadmium Telluride (CdTe), en Koper Indium Diselenide (CIS, oorspronkelijk ontwikkeld voor de ruimtevaart). Deze materialen beloven een soortgelijk kosten reductiepotentieel als het amorf Silicium, maar ze beloven tegelijkertijd hogere en stabielere conversie efficiëntie (tabel; 3.3.1) Verscheidene fabrikanten zijn al aan de gang met het opzetten van productie faciliteiten voor Cadmium Telluride cellen van 10 MW. Siemens Solar is zelfs al bezig met het commercialiseren van de CIS technologie.

De kosten verdeling van zonnecel systemen in 2000 was 74% voor de module (de cel), 14 % voor de inverter en kabels en 12% voor de installatie kosten. Omdat PV geen bewegende delen kent zijn onderhoudskosten erg laag (Ze moeten af en toe schoongemaakt worden). De module heeft een verwachte levensduur van 20 jaar, en de meeste andere onderdelen zoals de inverter, en controller etc. gaan ongeveer 10 jaar mee. Voor niet netgekoppelde systemen zijn batterijen de zwakke schakel. Zij moeten elke 5 jaar vervangen worden

Voor toekomstige systemen is het dus essentieel dat de prijs van de modules naar beneden gaat. Voor niet netgekoppelde systemen is het belangrijk dat de batterijtechnologie flink verbeterd wordt.

⁷⁰ Dresdner Kleinwort Wasserstein, a.w.

Source: Gregor Czisch, ISET, Kassel, Germany



Figuur 3.3.1 Zonnestralingsenergie per jaar per regio per m^2 loodrechte inval

Inpasbaarheid en locatie

Overal op aarde is de vermogensdichtheid van zonlicht ongeveer 1000 W/m^2 op een oppervlak loodrecht op de bundel zonlicht. Door verschil in klimaat en daglengte varieert het dagtotaal en is de maximaal ingestraalde energie per dag een sterke functie van breedtegraad en lokale weerscondities. Figuur 3.3.1 laat zien dat op onze breedtegraad de jaarlijkse instraling van zonne-energie ongeveer 800 kWh/m^2 is, terwijl dat in zuidelijker gelegen gebieden op kan lopen tot 2500 kWh/m^2 . Om een schatting te kunnen maken van de op te wekken elektriciteit is het nodig het totaal van de ingestraalde zonne-energie te vermenigvuldigen met de efficiëntie van de cel uit tabel 3.3.1. Aan elektriciteit kan een zonnecel dus in Nederland ongeveer $50\text{-}130 \text{ kWh/m}^2$ per jaar opwekken, terwijl dat in Noord-Afrika kan oplopen tot $125\text{-}400 \text{ kWh/m}^2$ afhankelijk van het type zonnecel. Per huishouden in Nederland gebruiken we ruwweg 3000 kWh/jaar , wat betekent dat elk huishouden $25\text{-}66 \text{ m}^2$ zonnecellen nodig heeft. Hierbij is nog geen rekening gehouden met de benodigde opslag van elektriciteit.

Kosten en opbrengsten

Een kostenschatting voor zon-PV systemen kan gemaakt worden aan de hand van een aantal grote en minder grote bestaande projecten. Als eerste voorbeeld dient het Oceanium in Diergaarde Blijdorp. Daar staat een netgekoppeld systeem van 5500 m^2 aan zon-PV (een geïnstalleerd vermogen van 550 kWp). De kosten waren ongeveer $\text{€}3.885.000$ voor een opbrengst van 320.000 kWh in het eerste jaar. Tijdens de levensduur van 20 jaar kan de opbrengst jaarlijks verminderen met ongeveer 1% tot 261.730 kWh in het twintigste jaar. Met een begin-investering van bijna 4 miljoen € wordt minimaal $6.000.000 \text{ kWh}$ over een periode van 20 jaar opgewekt. Met 10% jaarlijkse kosten (rente, afschrijving, enz) komt dit neer op een kostprijs van $1,20 \text{ €/kWh}$.

Een aantal andere voorbeelden van PV installaties wordt gegeven in tabel 3.3.2. De kosten lopen niet ver uiteen. Het is duidelijk dat kosten voor elektriciteit in de orde van $\text{€}1,-/\text{kWh}$ voor een grote inzet onacceptabel zijn. Cruciaal voor toekomstige grootschalige implementatie van zonnecellen is dus een kostenreductie met ongeveer een factor 10.

Tabel 3.3.2: voorbeelden van groot en kleinschalige zonne PV projecten met opgewekt vermogen en kosten per kWh elektriciteit (subsidie niet meegenomen)

plek	m ²	kWh/jaar	kWh/m ² jaar	Kosten (€)	€/kWhe
Lehr, Berlijn ⁷¹	1 870	160 000	85.6	3.7 M	
Blijdorp ⁷²	5 500	320 000	58.2	3.9 M	1.20
Veenendaal ⁷³	11 000	820 000	74.5		
Amsterdam ⁷⁴	10 000	750 000	75.0		
EB privé ⁷⁵	4	273	68	680-1000	0.9-1.31

Potentieel en toekomstige ontwikkelingen

Het potentieel in termen van plaatsingsmogelijkheden voor zon-PV is uiteraard enorm, de kosten zullen dit onder de huidige omstandigheden echter ook zijn. Technologische ontwikkelingen die een kostenreductie teweeg brengen zijn bij deze techniek dan ook absoluut noodzakelijk. Wanneer een forse kostenreductie niet realistisch is, is de bijdrage van zon-PV aan CO₂-reductie minimaal. Nieuwe types zonnecellen, zoals organische worden dan ook uitvoerig onderzocht.

Groei-potentieel

De gemiddelde investeringskosten voor zonne-energie zijn momenteel 5500 Euro/kWpiek. Tot dusver heeft zonne-energie een technologisch leerproces ondergaan waarbij de kosten per verdubbeling van de productiecapaciteit met 20% daalde. Aangezien zon-PV nog aan het begin staat van dit leerproces is het zeer de vraag of dit leerproces met 20% per verdubbeling doorzet.

Aangenomen dat het leerproces inderdaad gestaag doorgaat met 20% kosten verlaging (Figuur 3.3.2) per verdubbeling, hebben IIASA en EPIA voorspellingen gedaan voor de mogelijke groei van zon-PV in de komende 100 jaar. Deze zijn samengevat in tabel 3.3.3. Zon-PV zou dan in 2020 in 1% van de wereld elektriciteitsbehoefte kunnen voorzien. Daarna zijn nog grotere percentages mogelijk.

Net als met andere duurzame energiebronnen is er voor grootschalige toepassing van zon-PV ook grootschalige opslag van energie nodig. Indien aangenomen wordt dat 20% het maximum is van intermitterende energiebronnen zonder opslag, dan wordt een combinatie van zon, wind en andere bronnen problematisch.

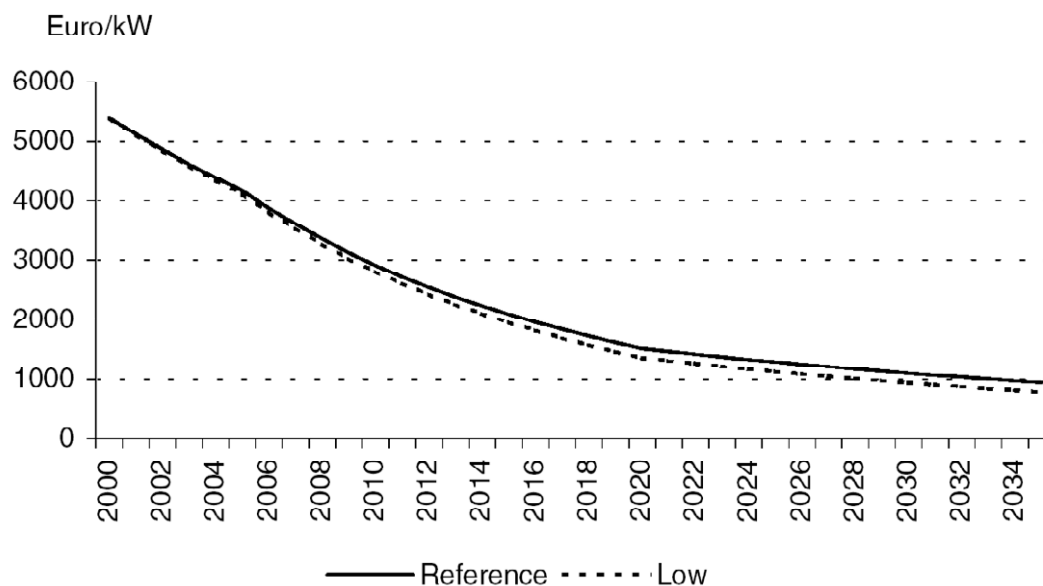
⁷¹ Renewable Energy World Sept/Oct 2003, 80-81. De oppervlakte is die van het bedekte dak. Dat zijn niet allemaal zonnecellen. De effectieve oppervlakte is 1146 m². Het lijkt me echter juist om, met het oog op grootschalige PV, de bruto oppervlakte te nemen.

⁷² Het Oceanium, Informatie van Hendrik-Jan Bosch. De prijs van het systeem zelf zou leiden tot € 0.82 /kWhe. De rest zijn bijkomende kosten zoals onderhoud en management.

⁷³ Patrimonium, sociale woningbouw. Uit: Stroom 17 Okt 2003, 1. De aangegeven getallen zijn berekend.

⁷⁴ De Dageraad, sociale woningbouw. Uit: Stroom, a.w.

⁷⁵ Volgens het uitgebrachte EPA advies berekend met dezelfde parameters als Blijdorp. De goedkoopste oplossing zou bij negeren van de rente leiden tot een prijs van € 0.50/kWhe. Bij een bedrijfseconomische benadering moet men echter rente meetellen en afschrijven over 20 jaar.



Figuur 3.3.2: Mogelijke kostenverloop als het leerproces van 20% reductie per verdubbeling wordt gerealiseerd⁷⁶

Tabel 3.3.3 Potentieel voor zon-PV indien grote kosten reductie plaatsvindt.⁷⁷

Region Source	2000 EPIA		2020 EPIA		2040 EPIA		2100 IIASA
	[GW]	[TWh]	[GW]	[TWh]	[GW]	[TWh]	[TWh]
North America							1,800
Latin America							1,564
Western Europe							1,293
Eastern Europe							880
FSU							2,104
Middle East							1,484
Africa							1,548
China							3,775
Southern Asia							1,420
Pacific Asia							4,675
Pacific OECD							337
Total world	1.4	2	195	275	3,190	7,370	20,880

Aandachtspunten

- Dramatische prijsreducties zijn noodzakelijk
- De energie terugverdientijd van zon-PV moet omlaag

⁷⁶ ECN, Learning and diffusion for solar power technologies, P. Lako, ECN-C-02-001

⁷⁷ Greenpeace/EPIA (2001): *Solar Generation*. September 2001 and IIASA: Christiansson, L. (1995): Diffusion and learning curves of renewable energy technologies. IIASA, WP-95-126, December 1995, Appendix A.

- Kostenreductie door massaproductie is duur.
- Research aan nieuwe types zonne-cellen is daarom noodzakelijk.

Experts verwachten dat het huidige type silicium cellen niet het type zal zijn dat grootschalig wordt ingezet en dat marktstimulering door grootschalige subsidie uiteindelijk een averechts effect heeft op acceptatie en implementatie⁷⁸.

Samenvatting en conclusies

Uitstoot

De energie terugverdientijd is nog lang. Zolang PV met fossiele bronnen gemaakt wordt zullen de emissies navenant zijn.

implementatie

Als je grootschalig wilt opwekken dan heb je aan daken niet genoeg. Kost dan wel veel ruimte.

voorzieningszekerheid

Netvariatie zal moeten worden opgevangen, althans bij grootschalige toepassingen.

potentieel

Er is een groot potentieel aanwezig, maar vooralsnog tegen hoge kosten

duurzaamheid

Hangt sterk af van CO₂-uitstoot bij fabricage

ontwikkelingslanden

Kwetsbaar systeem. Inverters zijn niet eenvoudig te repareren in ontwikkelingslanden

gelijkheid

Vanwege de nog hoge kosten niet geschikt om toegang van iedereen tot energie te waarborgen.

evaluatie

Elektriciteit uit zonlicht vindt thans al toepassingen, waar een electriciteitsnetwerk ontbreekt. Het is een duurzame bron met in principe veel mogelijkheden, die thans worden geremd vanwege de nog hoge kosten. Kostendaling en onderzoek naar andere dan de huidige types zonnecellen is daarom noodzakelijk.

⁷⁸ Frank van de Vleuten, Free Energy Europe, fabrikant van zonnecellen. Zonnecellen moeten nog een flinke technologische ontwikkeling doormaken (niemand gelooft nog dat alleen opschaling van productie de oplossing biedt), en de NL marktstimulering, met name de EPR regeling, heeft weinig tot niets bijgedragen aan het doorontwikkelen van PV- technologie. Het op "Nederlandse productie" (Shell Solar) gerichte Novem NOZ-PV deed het op het punt van PV technologie al niet veel beter *in haar marktstimulering* (wel op andere punten zoals stimulering van projectontwikkeling richting ontwikkelings-landen, innovatieve gebouwintegratie, etc.). Integendeel hebben wij de indruk gekregen dat de markt-acceptatie van nieuwe PV technologie moeizamer is geworden en de marktstimulering dus voor de nood-zakelijke langere termijn contra-productief heeft gewerkt. Dezelfde geluiden zijn ook te horen vanuit het Duitse PV paradijs, waar PV op een extreem niveau wordt gesubsidieerd, vooral met het oog op het PR en politieke effect. Ook daar ontbreekt de intelligentie in het stimuleringsprogramma om de ontwikkeling van nieuwe zonnecel technologie met de implementatie-subsidie extra steun in de rug te geven.

3.4 Elektriciteit uit waterkracht door Heleen de Coninck

Elektriciteit uit waterkracht is een zeer wijdverbreide technologie, die al op zeer grote schaal wordt toegepast, zowel in ontwikkelingslanden als in geïndustrialiseerde landen. Het is goedkoop, schoon en CO₂ vrij. Er worden nu grofweg twee typen waterkracht toegepast: in het ene geval (loopwaterkrachtcentrale) wordt in een snelstromende rivier een stuw gelegd met er naast een lagedruk turbine, die de stroom levert. Het verval is hier slechts enkele meters en de levering van stroom is sterk afhankelijk van de hoeveelheid water die de rivier vervoert. De andere variant is een stuwmeer, met een veel groter verval en toepassing van turbines die een hoge waterdruk kunnen hebben. Voor de stuwmeercentrale moeten vaak hele gebieden onder water worden gezet. Het is veel minder weersafhankelijk dan de loopwaterkrachtcentrale, aangezien variaties in de wateraanvoer kunnen worden opgevangen door het reservoir groot genoeg te maken. Voor Nederland is waterkracht nauwelijks relevant omdat we vrijwel geen verval hebben in onze rivieren⁷⁹.

Kosten en potentieel

De prijs van een kWh waterkracht hangt af van de omstandigheden, maar is concurrerend met fossiele brandstoffen: rond de 3 €/kWh. Waterkracht levert nu al 7% van de wereldwijde energieproductie en 19% van de elektriciteitsproductie, ca. 2600 TWh = 10 EJe. De geplande of gebouwde capaciteit zijn samengevat in tabel 3.4-1. Het wereldwijd technisch potentieel wordt ingeschat op 14000 TWh= 50 EJe. Het realiseerbaar potentieel ligt echter lager. Het economisch potentieel wordt geschat op ca. 8200 TWh⁸⁰= 30 EJe.

Tabel 3.4-1: Geplande realisatie van het waterkrachtpotentieel op de korte termijn van een aantal regio's en landen⁸¹.

Regio of land	Periode	Geplande of gebouwd wordende waterkrachtcapaciteit [GW]
Canada	2003 - 2012	6.6
Mexico	2007 - 2012	5.7
Centraal Amerika	2003 - 2016	4.4
Zuid Amerika	2003 - 2010 (en verder)	34.9
China	2002 - 2020	77.7
India	2003 - 2014	> 11.6
Afrika	2003 - 2010 (en verder)	9

Waterkracht, vooral uit grootschalige stuwmeercentrales, kan ingrijpende sociale en milieueffecten hebben. Hele dorpen moeten soms onder water worden gezet. In Brazilië

⁷⁹ In Nederland werd in 2001 voor 31 miljoen m³ aardgas uitgespaard door onze waterkracht. Dat is 1 PJ/jaar aan aardgas op een totaal energieverbruik van 3145 PJ. Bron: Statistisch Jaarboek CBS 2003, pag 308

⁸⁰ Lako et al., 2003, ECN-C-03-027, Hydropower development with a focus on Asia and Western Europe, zie ook Steve Fetter, Energy 2050, www.stanford.edu/group/CISAC, table 12, page 41

⁸¹ Lako, a.w.

is veel potentieel, maar de realisatie daarvan heeft tot gevolg dat veel toch al zo getergd regenwoud moet verdwijnen voor stuwmeren. Er zijn schattingen dat er in 2050 jaarlijks ongeveer 25 EJ aan waterkracht wordt geproduceerd, een beperkt gedeelte van het technisch potentieel. Er is een relatief grotere benutting mogelijk van het potentieel in kleinschalige, decentrale toepassingen voor rurale elektrificatie. Dit vergt wel een heel ander soort planning.

Het IPCC⁸² schat het potentieel voor reductie aan uitstoot van CO₂ van kolen naar waterkracht in op 5,5 Mt CO₂/yr tot ca. 14 Mt CO₂/yr in 2010 en ongeveer twee keer zo hoog voor 2020.

Het potentieel voor waterkracht zal in Europa, de VS, en een aantal ontwikkelingslanden snel uitgeput zijn, al is dat sterk afhankelijk van de bereidheid van regeringen om onwaarschijnlijke projecten te ondernemen. De Driestromendam in de Yangtse wordt bijvoorbeeld 18,2 GWe groot, met een opbrengst van 84 000 GWh per jaar bij optimale benutting, dat levert 10% van het elektriciteitsgebruik in China bij ingebruikneming in 2010. De prijs hiervoor is echter hoog: grootschalige, onzekere milieueffecten, 2 miljoen mensen die moeten verhuizen en veel landbouwgrond die verloren gaat. Vooral de onzekerheden van het onder water zetten van zoveel land zijn groot. Wat gebeurt er met het klimaat, en met de loop van de Yangtse als de dam in gebruik wordt genomen?

Aandachtspunten

De nadelen van waterkracht, met name grootschalige stuwmeerwaterkracht, zijn significant. Door het onder water zetten van land kunnen (bijvoorbeeld door rotting) andere broeikasgassen vrijkomen – een nadelig neveneffect. Ook zware metalen kunnen worden gemobiliseerd, zoals het vermoeden is bij de Driestromendam in de Yangtse in China. De afhankelijkheid van weer en klimaat brengt soms de voorzieningszekerheid in gevaar. Bij loopkrachtcentrales is de elektriciteit sterk afhankelijk van het weerbeeld over een seizoen. In de winter en zomer van 2003 was er een elektriciteitscrisis in het sterk op waterkracht leunende Noorwegen. In de winter was het zo koud dat de rivieren grotendeels bevroren waren, en de elektriciteitsopwekking niet kon plaatsvinden. De ernst van de situatie werd nog vergroot omdat in Noorwegen ook verwarming grotendeels op de daar spotgoedkope elektriciteit draait en in de koude winter de vraag dus toenam. De prijs van elektriciteit in de geliberaliseerde elektriciteitsmarkt werd opgedreven. Dit had zelfs tot gevolg dat minder kapitaalkrachtige mensen in die koude winter hun rekening niet meer konden betalen en letterlijk in de kou kwamen te zitten. De droogte in de zomer leverde weer tekorten op. Noorwegen plant nu meer in te zetten op gas, overigens eventueel gecombineerd met CO₂ opslag.

In Ghana staat ook veel waterkracht opgesteld. Daar leidde een serie droge zomers tot minder afvoer van de regenrivieren, en vielen zelfs de stuwmeren droog. Dit leidde tot grote tekorten aan elektriciteit en vormde een serieuze belemmering voor de economie. Inzet op kolen is de oplossing die de Ghanese regering nastreeft.

Het lijkt erop dat waterkracht vooral voor de korte termijn een goedkope en zeer commercieel haalbare maatregel is. Het levert geen afdoende oplossing voor de elektriciteitsvoorziening voor de langere termijn, al kan het er wel deel van uitmaken.

⁸² IPCC, Third Assessment Report of Working Group III: Mitigation. Cambridge University Press, 2001.

Samenvatting en Conclusies

Uitstoot

Stuwmeerwaterkrachtcentrales hebben een zeer positieve invloed op broeikasgas-uitstoot, mits voorzorgen worden getroffen bij de aanleg. Stuwmeercentrales kunnen wel andere vervuilers dan broeikasgassen genereren, maar hebben niet de externe milieukosten die opwekking van elektriciteit uit fossiele bronnen genereren.

Implementatie

Stuwmeerwaterkracht neemt erg veel ruimte in en draagt door de grote landschappelijke invloeden ook bij aan horizonvervuiling. Geluidsoverlast en maatschappelijke acceptatie zijn gemiddeld. Met name kleinschalige loopwatercentrales liggen goed in de publieke opinie en veroorzaken weinig horizonvervuiling. Ook kosten ze geen extra ruimte.

Zekerheid

De toevoer van water kan afhankelijk zijn van weersomstandigheden, met name bij loopwatercentrales. Bij grootschalige stuwmeercentrales kan er een risico op terrorisme bestaan. Waterkracht scoort goed op proliferatierisico en technologische eenvoud. Ook is het goed inpasbaar in de huidige energie infrastructuur.

Potentieel

Waterkracht heeft potentieel om broeikasgasuitstoot te verminderen maar het potentieel in zowel stuwmeer- als loopwatercentrales is niet onuitputtelijk. Vanwege de technologische eenvoud en de volwassenheid van de technologie is het economisch potentieel vermoedelijk relatief snel uitgeput.

Duurzaamheid

Waterkracht, mits op verantwoordelijke wijze toegepast, kan een bijdrage leveren aan duurzaamheid over 200 jaar.

Ontwikkelingslanden

Waterkracht kan in ontwikkelingslanden goed worden toegepast. Het meeste thans resterende economische potentieel ligt in ontwikkelingslanden. Zowel stedelijke als rurale toepassingen zijn denkbaar.

Gelijkheid

Waterkracht kan eraan bijdragen tot een gelijkwaardige voetafdruk in termen van broeikasgasuitstoot te komen.

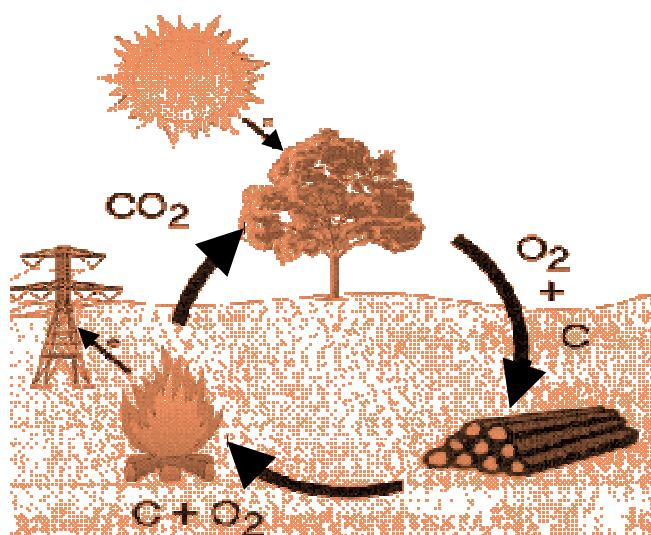
3.5 Energie uit biomassa door Rokus Wijbrans

Definitie

Bio-energie is een verzamelnaam voor energie die vrijgemaakt wordt uit (organisch) afval en biomassa. Onder invloed van zonlicht (fotosynthese) wordt CO_2 uit de atmosfeer vastgelegd in plantaardig materiaal (biomassa). De CO_2 wordt hierbij in de vorm van allerlei koolstofverbindingen vastgelegd (C). Biomassa kan derhalve worden beschouwd als een indirecte vorm van opgeslagen zonne-energie. Dit plantaardig materiaal kan direct als energiebron dienen. Via de voedselketen kan het plantaardig materiaal ook omgezet worden in dierlijk organisch materiaal. Mest wordt daarom ook gezien als vorm van bio-energie.

Waarom biomassa

Door gebruik te maken van bio-energie hoeft er geen *extra* CO_2 vrij te komen. Dit in tegenstelling tot fossiele brandstoffen, waar bij de verbranding de CO_2 vrijkomt die in een tijdsbestek van miljoenen jaren is opgeslagen in steenkool, aardolie en aardgas (via omzetting van plantaardige materialen).



Figuur 3.5.1: Gesloten CO_2 -kringloop bij een verantwoorde inzet van biomassa. Verbranding van het plantaardige materiaal levert CO_2 op, die vervolgens met zonlicht weer wordt vastgelegd in biomassa.

Bij de omzetting van de biomassa komt wel CO_2 vrij, maar deze is kort daarvoor tijdens de groei van de planten vastgelegd door de fotosynthese. Voorwaarde voor een verantwoorde inzet van biomassa als energiebron is derhalve dat evenveel biomassa wordt aangeplant als er wordt verbruikt, zodat een toename van CO_2 wordt voorkomen. Door nieuwe aanplant is bio-energie een onuitputtelijke energiebron en levert ze geen bijdrage aan het broeikas effect.

Voorts kan nuttig gebruik worden gemaakt van organische afvalstoffen die aan het eind van hun gebruikscyclus zijn gekomen. Een voorbeeld hiervan is de winning van stortgas. Het organische afval van een stortplaats wordt door bacteriën in de stort omgezet in methaan (stortgas). Dit stortgas wordt op de stortplaats gewonnen en vervolgens ingezet voor de energievoorziening. Door dit methaan gecontroleerd te winnen wordt tevens voorkomen dat er een ongecontroleerde emissie van het sterkere broeikasgas methaan uit stortplaatsen plaatsvindt.

Naast haar functie in de energievoorziening is biomassa ook een noodzakelijke grondstof voor de chemische industrie, als fossiele grondstoffen schaars en duur worden. Dat aspect wordt in dit hoofdstuk slechts zijdelings aangestipt.

Typen biomassa

Verschillende typen biomassa worden onderscheiden. Het onderscheid betreft hier met name de oorsprong van de biomassa en de wijze waarop ermee wordt omgegaan. Voor een verantwoorde inzet van biomassa is dit onderscheid zeer belangrijk. De soorten biomassa zijn:

1. *biomassa uit rooibouw*: dit betreft de biomassa die wordt gewonnen door het (onverantwoord) kappen van bestaande bossen, waarbij geen aanplanting van bomen plaatsvindt. Meestal vindt dit grootschalig plaats, en leidt dit tot bodemerosie en verschraling van een gebied. Zodra meer biomassa wordt gekapt of verwijderd (via houtspokkel) dan er wordt aangeplant of op een natuurlijke wijze bijkomt, wordt dit beschouwd als rooibouw.
2. *organisch afval*: alle organische bijproducten uit land- en bosbouw, zoals stro, bagasse, mest, dierlijke reststoffen, dunningshout, schors etc, voorts biomassa afvalstromen zoals bermgras, gebruikt hout, oud papier, RWZI-slib, organische afvalstromen zoals GFT, bouw- en sloopafval, en industrieel afval van organische oorsprong.
3. *geteelde biomassa*: dit betreft speciaal voor de energieopwekking geteelde energie- en landbouwgewassen. Dit kan zowel biomassa (hout) van op een verantwoorde duurzame wijze geëxploiteerde productiebossen (snelgroeiende boomsoorten) zijn als één- of meerjarige teeltgewassen (suikerriet, mais, miscanthus of olifantsgras, etc)

Er wordt ook onderzoek verricht naar het gebruik van de biomassa uit kelp⁸³, een soort alg. Die kan worden gekweekt in zee en staat daarmee niet in competitie met de voedselvoorziening op land. Bovendien zou de omzettefficiëntie van zonlicht in kelp hoog zijn, misschien wel 10 keer zo hoog als voor biomassa op land. Dit onderzoek is stellig zinvol, maar de verwerking van kelp laten wij in dit hoofdstuk verder buiten beschouwing.

Verantwoorde inzet

Teneinde biomassa als duurzame energiebron toe te passen, moet het op een verantwoorde manier worden ingezet. Dit betreft zowel de productie en winning van de biomassa zelf, als de verwerking van de biomassa tot nuttige energie. De drie hierboven genoemde soorten biomassa komen hier achtereenvolgens aan de orde.

Biomassa uit rooibouw

Zoals duidelijk zal zijn, is deze eerste vorm van biomassa zeer ongewenst en leidt het tot een verslechtering van de leefbaarheid en verdere klimaatproblemen op de langere termijn. Deze vorm komt in ontwikkelingslanden echter veel voor, en is voor de mensen daar vaak de enige mogelijkheid om zich op korte termijn van een inkomen te kunnen voorzien. Het wrange is dat de marktvraag naar de houtproducten vanuit de ontwikkelde landen veelal de drijfveer is. Zonder structurele alternatieven aan te bieden blijft deze verdere destructie van de bestaande leefgebieden bestaan. Alleen door middel van (gehandhaafd) duurzaam bosbeheer in combinatie met perspectief voor de lokale bevolking op inkomen op een alternatieve wijze kan hierin verandering worden gebracht.

⁸³ www.oceansatlas.com/unatlas/uses/EnergyResources/Background/Biomass/B1.html

Biomassa uit organisch afval

Deze tweede vorm van biomassa kan een verantwoorde manier zijn om het bestaande afval te verwerken en nuttig in te zetten in de energievoorziening. Uitgangspunten bij inzet van organisch afval voor de energievoorziening zijn

1. vermindering van de afvalstroom waar mogelijk;
2. hergebruik van het afval in nieuwe producten;
3. omzetting van het resterende afval in energie.

Door bewust met afval om te gaan, kan verspilling worden voorkomen. Het resterende afval dient vervolgens op een dusdanige manier te worden omgezet naar nuttige energie dat schadelijke emissies zo veel mogelijk worden geminimaliseerd.

Biomassa uit energieteelt

Het grootste deel van de biomassa als hernieuwbare energiebron moet uit energieteelt komen. Dit betreft zowel in Nederland geteelde biomassa als import van geteelde biomassa uit bijvoorbeeld de Baltische staten, Canada en Zuid-Amerika. Teneinde de energieteelt op een verantwoorde, duurzame wijze te laten plaatsvinden, dienen aanvullende eisen te worden gesteld aan de productie van de biomassa. Zo mag biomassateelt niet ten koste gaan van de voedselproductie. Daarnaast dient uitputting van de bodem te worden voorkomen, en moet ook het water- en nutriëntengebruik op een verantwoorde wijze plaatsvinden. Het toepassen van grootschalige monoculturen is waarschijnlijk ongewenst. Al deze aspecten leiden ertoe dat de kosten per geproduceerde m³ biomassa omhoog gaan. Voorwaarde voor verantwoorde teelt is dat een vergoeding wordt gegeven voor de kwaliteit van de wijze waarop de biomassa wordt geproduceerd, bijvoorbeeld door te betalen voor maatschappelijke inpasbaarheid, onderhoud van het landschap, duurzaam bodembeheer, recreatie-, cultuur- en natuurwaarden, etc.

Voorwaarden voor verwerking

Teneinde daadwerkelijk duurzame energie te produceren uit de biomassa, dienen overige emissies zoals stikstofoxiden, zwaveloxiden, en zeker dioxines, (zware) metalen, en andere schadelijke stoffen te worden geminimaliseerd. Deze overige emissies kunnen vooral vrijkomen bij de omzetting van afvalstromen naar energie. Bij energieteelt zijn weinig tot geen schadelijke componenten aanwezig in de biomassa. Reductie van overige emissies kan worden bereikt door gebruik te maken van de juiste processen en nieuwste technologie, inclusief noodzakelijke reinigingsstappen. De kosten nemen hierdoor wel toe. In de praktijk zien we vaak het tegengestelde: vanuit het streven naar duurzame energie (in Nederland vertaald als energie zonder of met zeer beperkte CO₂-emissies), worden minder tot geen eisen gesteld aan de overige emissies (NO_x, SO_x, zware metalen (met name kwik en cadmium), dioxines, etc.) omdat dit kostenverhogend werkt en hierdoor de doelstelling van betaalbare 'duurzame' energie wordt beperkt. Dit lijkt echter op het creëren van nieuwe problemen in de toekomst, met als gevolg verminderd draagvlak en extra maatschappelijke kosten op de langere termijn.

Bij de inzet van biomassa wordt door onze groep derhalve uitgegaan van maximale reinigingsstappen, waardoor overige emissies worden geminimaliseerd. Dit is tot op

zekere hoogte strijdig met het huidige beleid, waarbij aan biomassa installaties minder stringente eisen worden gesteld.

Voordelen van biomassa

Wanneer aan bovenstaande voorwaarden ten aanzien van productie, winning en omzetting wordt voldaan, heeft de inzet van biomassa voor de energievoorziening diverse voordelen:

- Biomassa is een hernieuwbare energiebron die niet bijdraagt aan het broeikaseffect.
- Biomassa brandstoffen uit energieteelt hebben in het algemeen verwaarloosbare zwavelconcentraties en dragen derhalve niet bij aan de emissie van SO₂, een verzurende stof.
- De omzetting van organisch afval in energie vermindert het afvalstoffenprobleem.
- Biomassa is een lokale energiebron, en derhalve minder gevoelig voor prijsfluctuaties op wereldschaal of voor onzekerheid in aanbod.
- Meerjarige energiegewassen hebben een lagere milieu-impact dan agrarische gewassen. Biomassa aanplant kan bodemerosie voorkomen.

Nadelen en/of risico's

Naast bovengenoemde voordelen van biomassa is er echter ook een aantal mogelijke nadelen en/of risico's verbonden met de inzet van biomassa voor de energievoorziening. Sommige hiervan zijn reeds als voorwaarde genoemd. Voor de volledigheid een zo compleet mogelijk overzicht.

- Biomassa heeft een relatief lage (energie)dichtheid. Hierdoor zijn grote volumes nodig. Transport en bewerking is daardoor moeilijk en duur. Energieconversie in de buurt van de bron is gewenst.
- Onvolledige verbranding van biomassa leidt tot diverse schadelijke emissies. Bij verbranding op hoge temperatuur wordt NO_x, een verzurende stof, gevormd. Om deze negatieve aspecten tegen te gaan moet worden geïnvesteerd in additionele omzettings- of reinigingsstappen, hetgeen kostenverhogend werkt.
- De vanwege de beperkte energie inhoud gewenste decentrale verwerking van biomassa vraagt om kleinschalige omzettingssystemen. Reinigingstechnologie voor kleinschalige verbrandings- en vergassingssystemen is (zeker voorlopig) naar verhouding duur.
- In ontwikkelingslanden zorgt de verbranding van traditionele biomassa in gebouwen (voor koken, verwarming) momenteel voor gezondheidsproblemen. Dit betreft met name de inzet van biomassa in de woning zonder goede afvoer van de verbrandingsgassen.
- Verbranding van wijd uiteenlopende organische afvalstromen (o.a. kippenmest, rioolslib, etc.) vraagt, vanwege het grotere gehalte aan ongewenste componenten om aanvullende reinigingstechnieken die de betreffende techniek naar verhouding duur maken.
- Grootschaliger verbranding of vergassing leidt in veel gevallen tot een warmteoverschot op de betreffende locatie, met een minder efficiënte inzet van de schaarse biomassa tot gevolg.
- Grootschalige kap van (regen)wouden kan leiden tot ontbossing, bodemerosie en lokale schaarste, met grote ecologische en sociale consequenties.

- Er kan een potentieel conflict ontstaan tussen gebruik van land en water voor bio-energie en andere toepassingen, zoals voedsel.

Potentieel van biomassa

Naast zonne-energie wordt aan biomassa het meeste perspectief toegekend om op langere termijn een groot deel van de benodigde duurzame energie te leveren. Belangrijke basisgedachte achter het potentieel van biomassa is het feit dat biomassa kan worden opgeslagen, waardoor fluctuaties in vraag en aanbod over het jaar heen kunnen worden opgevangen. Daarnaast is biomassa geschikt als energiedrager voor mobiele toepassingen. Dit omdat het naast waterstof ook koolstof bevat, waardoor uit biomassa brandstoffen met een hoge dichtheid kunnen worden geproduceerd (benzine, diesel).

De huidige bijdrage van biomassa aan de totale wereldenergie bedraagt ca 14% (ca. 50 EJ/jr op een totaal van 406 EJ/jr⁸⁴ en betreft voornamelijk organische reststromen en houtkap uit bestaande bossen. In ontwikkelingslanden bedraagt het aandeel biomassa (traditioneel) ca. 35%; dit is met name de op een niet duurzame manier geoogste biomassa ('roofbouw'). Daarnaast wordt deze biomassa in het algemeen op een niet-efficiënte wijze omgezet in warmte en/of elektriciteit met negatieve consequenties voor het lokale milieu.

In de geïndustrialiseerde landen bedraagt het aandeel biomassa volgens dezelfde bron ca. 3% (combinatie van energieteelt en organisch afval). De Derde Energienota van het Ministerie van Economische Zaken uit 1995 geeft aan dat Nederland in 2020 10% van haar energiebehoefte (= 288 PJ) met duurzame bronnen dient te worden gedekt. Het aandeel in 1995 is ca. 1%, waarbij energie uit afval (AVI'S, stortplaatsen) de grootste bijdrage levert (33 PJ). In het actieprogramma "Duurzame energie in opmars"⁸⁵ is de verwachte bijdrage van de verschillende duurzame bronnen vanaf 2000 tot 2020 aangegeven. Ruim 40% van de duurzame energie doelstelling in 2020 dient door afval en biomassa te worden ingevuld (120 PJ op totaal van 288 PJ). Potentieel beschikbare hoeveelheden biomassa in Nederland bedraagt, volgens een systematische analyse van ECN voor reststromen 30 tot 80 PJ en voor binnenlandse energieteelt 12 tot 70 PJ⁸⁶. Voor de import van duurzaam geëxploiteerd hout zijn voor Nederland tot 2020 nog geen beperkingen voorzien.

De totale geschatte biomassaproductie op aarde bedraagt ca. 3.000 – 4.000 EJ/jaar⁸⁷. Voor het voeden van tien miljard mensen in 2050 is ongeveer 40 EJ/jaar aan voedsel nodig. De verwachting is dat de resterende hoeveelheid landbouwgrond, tezamen met resthout uit bossen en afvalstromen voldoende is voor een primair energie equivalent van 500 EJ/jaar. Verschillende scenario's verwachten in 2050 een bijdrage van biomassa aan de energievoorziening van 100 – 300 EJ/jaar⁸⁸. Een overzicht hiervan, inclusief de verwachte energiebehoefte is gegeven in tabel 3.5.1.

⁸⁴ EUBIA, European Biomass Industry Association, www.eubia.org, 2003.

⁸⁵ Duurzame energie in opmars, Actieprogramma 1997 – 2000, Ministerie van Economische Zaken, maart 1997.

⁸⁶ EUBIA, a.w.

⁸⁷ TVVL Magazine, maart 2003.

⁸⁸ World Energy Assessment, Chapter 7, Renewable Energy Technologies, W. C. Turkenburg, 2000.

Tabel 3.5.1: Potentiële bijdrage van biomassa aan de wereld energiebehoefte

Bron	Eindjaar	Verwachte energievraag [EJ / jaar]	Bijdrage biomassa [EJ / jaar]	Opmerkingen
RIGES (Johansson e.a, 1993)	2025	395	145	Obv berekening met RIGES model
	2050	561	206	
Shell (Kassler, 1994)	2060	1.500	220	Sustained Growth scen. Dematerialization scen.
		900	200	
WEC (1994a)	2050	671 – 1.057	94 – 157	Obv uitkomsten drie scenario's
	2100	895 – 1.880	132 – 215	
Greenpeace, SEI (Lazarus e.a, 1993)	2050	610	114	Fossiele brandstoffen uitgefaseerd in 21 ^e eeuw
	2100	986	181	
IPCC (Ishitani & Johansson, 1996)	2050	560	280	Biomassa intensieve energie systeem ontwikkeling
	2100	710	325	

Wolf⁸⁹ vergelijkt het biomassa potentieel van diverse studies met een uitgebreide eigen analyse. De beschikbare hoeveelheid biomassa voor energiedoeleinden ligt in deze studies tussen 0 en maximaal 650 EJ/jaar. De beschikbare hoeveelheid biomassa is hierbij onder meer afhankelijk van de intensiteit van de landbouw productiemethodieken en de voedselbehoefte (type en hoeveelheid).

Voor biomassaproductie is veel land benodigd. De productiviteit van typische gewassen als wilg en eucalyptus bedraagt 8 – 12 ton droge stof per hectare per jaar. Met een energie-inhoud van 1 ton droog schoon hout van 18 GJ levert 1 hectare ca. 140 – 220 GJ per hectare per jaar. Hierbij is rekening gehouden met de benodigde energie input voor bemesting, oogst, etc. Voor de productie van 1 PJ is dan 4.500 tot 7.000 ha nodig.

Het aandeel afval wordt in een overzicht van diverse studies⁹⁰ geschat op tussen 30 en 60 EJ per jaar in 2025, onderverdeeld naar ca. 30% resthout uit bossen, 45% uit suiker, granen etc. en ca. 25% uit mest en huishoudelijk afval (Municipal Solid Waste, MSW).

Al met al kan worden geconcludeerd dat biomassa een nuttige bijdrage kan leveren aan de energievoorziening. Om biomassa als duurzame energiebron te kunnen inzetten, dient aan de productie van de biomassa voor energieteelt een aantal, in het voorafgaande beschreven, additionele eisen te worden gesteld. Hiermee dient uitputting van de bodem, verontreiniging van bodem en lucht, verminderde kwaliteit van het leefgebied door grootschalige monoculturen⁹¹ en het ontstaan of instandhouden van ongelijkheid en uitbuiting⁹² te worden voorkomen.

⁸⁹ J. Wolf et al, *Agricultural Systems* 76 (2003) 841-861

⁹⁰ Lysen et al., *Beschikbaarheid Biomassa voor energie-opwekking*. Rapport 2GAVE00.01 – 9922, Utrecht Centre for Energy Research / Novem – GAVE 2000. GAVE is een door Novem in opdracht van de ministeries van VROM en EZ uitgevoerd programma. GAVE staat voor de inventarisatie en analyse van nieuwe GASvormige en Vloeibare Energiedragers.

⁹¹ Biomassa plantages kunnen ten koste gaan van de biodiversiteit. Dit is waar wanneer het wordt vergeleken met een bestaand, natuurlijk bos en de biomassaplantage dit bos zou vervangen. Wanneer biomassaplantages worden gerealiseerd op braakliggend land kan juist een rijkere biodiversiteit worden gecreëerd. In de ontwikkelde landen is ca. 2 miljard hectares aan land beschikbaar. Door aanvullende maatregelen (goed ontwerp, gemengde teelten, creëren van gebieden met oorspronkelijke flora en fauna, etc.) kan worden voorkomen dat met monoculturen geassocieerde problemen ontstaan.

⁹² Bij het ontwikkelen van grootschalige productiegebieden voor biomassa ontstaat het risico dat boeren de biomassa tegen minimale kosten moeten verbouwen met als gevolg uitputting van het milieu en slechte lokale leefomstandigheden. Het risico hierop is het grootst wanneer de verwerking / conversie van de

Omzetting van biomassa naar nuttige energie

Het proces van biomassa naar nuttige energie kan globaal worden opgeknipt in drie delen

1. Bron + voorbereiding van de biomassa
2. Conversiesysteem / conversietraject
3. Eindproduct

De gekozen route hangt af van het type biomassa en van het gewenste eindproduct. De belangrijkste eindproducten zijn:

- *Warmte en stoom*: de warmte en/of stoom wordt gebruikt voor (industriële) processen of voor verwarming van gebouwen, warm tapwater, in een stoomturbine voor de productie van elektriciteit, etc.
- *Elektriciteit*: elektriciteit kan zowel decentraal in WKK's (warmte-kracht koppelingsinstallaties), als centraal in grote verbrandingsinstallaties (via stoomturbines) en vergassingsinstallaties (via gasturbine en stoomturbine) worden geproduceerd.
- *Brandbaar Gas*: Synthesegas, SNG, H₂. Synthesegas is een mengsel van koolmonoxide (CO) en waterstof (H₂). Het is de basisgrondstof voor de productie van diverse (vloeibare) brandstoffen en chemicaliën, en kan ook worden gebruikt in gasturbines en gasmotoren voor omzetting naar elektriciteit. SNG staat voor synthetisch aardgas (Synthetic Natural Gas). In dit geval wordt het synthesegas omgezet naar aardgaskwaliteit, waarna het kan worden toegevoegd aan het gasnet of kan worden gebruikt voor mobiele toepassingen. Tot slot is het relatief eenvoudig om het synthesegas om te zetten naar waterstof door omzetting van de CO met water (H₂O). Waterstof kan worden ingezet in diverse industrieën, voor elektriciteitsproductie (liefst via een brandstofcel) en voor transport.
- *Vloeibare brandstoffen*, ook wel biofuels genoemd. Mogelijke brandstoffen zijn onder andere methanol, ethanol, (FT) benzine, (FT) diesel, dimethylether (DME), rapeseed methylester (RME) en waterstof. FT staat hierbij voor Fischer-Tropsch synthese, een thermisch proces om benzine of diesel te maken uit een synthesegas. In eerste instantie kunnen conventionele brandstoffen als benzine en diesel (voor een deel) worden vervangen door 'eenvoudige' biobrandstoffen als bio-ethanol en bio-diesel (RME, uit plantaardige oliën). Later kan eventueel worden overgegaan op nieuwe brandstoffen als methanol of waterstof. Deze brandstoffen vragen echter om een volledig nieuwe infrastructuur. Invoering van deze brandstoffen is hierdoor veel complexer.

Een overzicht van mogelijke conversieroutes van biomassa naar eindproduct is gegeven in figuur 3.5.2. De conversieroutes kunnen in principe worden onderscheiden in twee hoofdroutes:

- Biologische conversie
- Thermische conversie

biomassa gebeurt door een beperkt aantal grote tot zeer grote wereldspelers, waarbij de afstand tussen productie- en conversielokatie groot is.

Biologische conversieprocessen

Anaërobe vergisting

Dit is de vertering van plantaardig of dierlijk materiaal door micro-organismen onder zuurstofloze omstandigheden. De micro-organismen zetten de organische stof om in een mengsel van methaan (50 – 70%) en CO₂. Ongeveer de helft van de in de biomassa aanwezige koolstof wordt omgezet naar gasvormige brandstof. Het proces vindt plaats in een waterig milieu (vochtgehalte > 50%), en wordt daarom primair toegepast voor de verwerking van natte biomassa en afvalstromen. Dit betreft zowel slurrie-achtige afvalstromen (bijvoorbeeld afvalwater, industriële afvalstromen uit de aardappel- en bierindustrie en mest) als natte vaste-afvalstromen (zoals GFT en veilingafval). Het biogas wordt meestal toegepast in warmte-kracht eenheden (WKK) voor de gelijktijdige productie van elektriciteit en warmte of in ketels voor de productie van warmte. Op een aantal plaatsen wordt de biogas opgewerkt tot aardgaskwaliteit (SNG), waarna het aan het gasnet wordt toegevoegd. Een laatste toepassing betreft de inzet van biogas als transportbrandstof. Met name in Zweden wordt deze route steeds vaker toegepast.

Vergisting is een commercieel toepasbare (afval)verwerkingstechniek en kan zowel grootschalig als kleinschalig worden toegepast. De energietoepassingen van biogas zijn echter nog niet alle uitontwikkeld. Met name kleinschalige WKK en kleinschalige omzetting naar aardgaskwaliteit zijn nog experimenteel en naar verhouding te duur. Het netto energetisch rendement voor vergisting in combinatie met omzetting naar elektriciteit in een WKK en zonder benutting van de warmte ligt in de orde van 10 - 12%. Bij omzetting van het biogas naar aardgaskwaliteit is het netto energetisch rendement 30 – 40%. De oorzaak van dit (zeer) lage rendement is dat een groot deel van de verbrandingswaarde achterblijft in de vaste fractie die resteert na completering van het vergistingsproces. Deze fractie kan goed worden benut als meststof voor de landbouw, waardoor bespaard wordt op kunstmestproductie, en het mestoverschot wordt opgelost. Het totale energetisch rendement wordt hierdoor hoger. Bij veel vergistingsprocessen is het reduceren van de hoeveelheid afval het hoofddoel. De hoeveelheid biogas die hierbij wordt geproduceerd is meestal van secundair belang. Naar verwachting kan daarom het (biogas) omzettingsrendement van veel processen nog worden geoptimaliseerd. Vergisting lijkt dan ook zeker interessant voor de verwerking van natte biomassa- en organische afvalstromen.

Stortgas

Dit is een specifieke vorm van anaërobe vergisting. De organische fractie van huishoudelijk afval van stortplaatsen wordt in de stort zelf vergist en omgezet in methaan en CO₂. Het betreft een natuurlijk proces, waarbij de in huishoudelijk afval aanwezige organische stof wordt omgezet. De stortplaats wordt afgedekt met een luchtdichte laag, zodat geen methaan kan ontsnappen (want dat is een sterk broeikasgas) en het anaërobe proces niet wordt verstoord. Het gasmengsel wordt afgevangen en vervolgens omgezet in aardgas, elektriciteit en/of warmte of toegepast als transportbrandstof.

Fermentatie / biochemische conversie

Fermentatie (gisting) is een biochemisch proces, waarbij een grondstof door bacteriën of door gist omgezet wordt tot ethanol. Ethanol is de alcohol die wij kennen uit bier en wijn. Vier stappen worden bij fermentatie onderscheiden, namelijk voorbehandeling, versuikering, conversie van suiker tot ethanol (de eigenlijke fermentatie) en ethanolafschieding door destillatie. Suikerhoudende gewassen (o.a. suikerriet, sorghum,

suikerbiet) leveren direct suiker (glucose) op. Zetmeelhoudende gewassen, zoals granen en aardappelen vereisen een behandeling met een bepaald type enzymen of zuren om het zetmeel en de cellulose tot suikers af te breken. In dit geval zijn al twee stappen nodig. Ook houtachtige stoffen (inclusief papier) kunnen worden gefermenteerd. Bij deze typen biomassa moet in de voorbereiding als eerste de houtstructuur worden kapot gemaakt met stoom of met zuren (dit levert cellulose), om vervolgens de cellulose met enzymen in de gewenste suikers om te zetten. Het hele proces is in verschillende configuraties uitvoerbaar, waarbij gebruik kan worden gemaakt van aparte reactoren voor de verschillende stappen, maar ook het uitvoeren van alle stappen in één reactor is mogelijk. De geproduceerde ethanol wordt vooral toegepast als transportbrandstof. Momenteel wordt ethanol bijgemengd bij benzine. In de VS mengt men tot 10% bij, in Brazilië zelfs tot 22%. Door bestaande motoren aan te passen zijn deze in staat om ethanol te gebruiken in plaats van benzine.

Fermentatie van suikerhoudende grondstoffen is commercieel beschikbaar. Het energetisch rendement ligt tussen 30 % en 40%. Dit is niet het geval voor fermentatie van houtachtige materialen. Productie van ethanol uit houtachtige gewassen bevindt zich in een opschalingstraject (bench-scale).

Extractie

Door middel van extractie worden oliën onttrokken aan zaden zoals bijvoorbeeld koolzaad, sojabonen, palm- en zonnebloempitten. Extractie kan op twee manieren: de eerste is door mechanische persing van de zaden, en de tweede is met behulp van oplosmiddelen, zoals hexaan. Na persing blijft een oliekoek (raapkoek) over die kan worden ingezet als veevoeder.

De verkregen olie kan worden toegepast als alternatief voor dieselolie. Het wordt daarom biodiesel genoemd. Voor de toepassing als biodiesel is verdere chemische verwerking nodig. Hierbij wordt de olie veresterd tot methylesters die geschikt zijn voor het bijmengen met dieselbrandstof tot een percentage van 50 % van de massa, zonder dat aanpassing aan de motoren noodzakelijk is. Bij hogere percentages (tot 100%) dient de bestaande motor te worden aangepast. Methylester afkomstig van koolzaadolie wordt RME (Rapeseed Methyl Ester) genoemd.

De productietechniek is commercieel beschikbaar. Het energetisch rendement van extractie en verestering is ca. 40%. Uitgaande van koolzaad kan ca. 30 – 50 % van de massa van het koolzaad als olie worden verkregen.

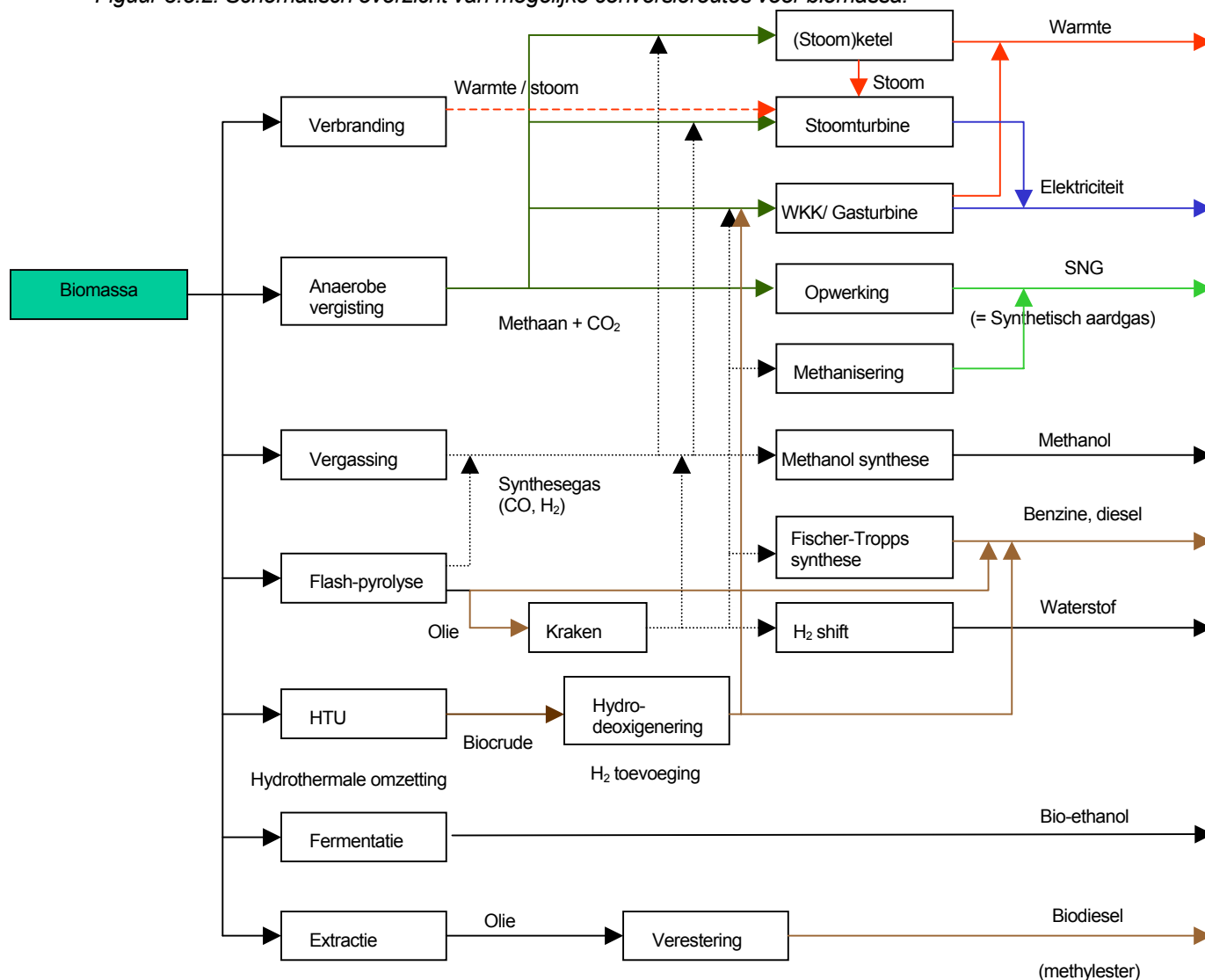
Thermische conversieprocessen

Verbranding

Bij verbranding wordt biomassa rechtstreeks verbrand bij een overmaat aan zuurstof. De producten van verbranding zijn kooldioxide (CO₂), water (H₂O) en warmte. De bij de verbranding vrijkomende warmte kan worden benut voor de opwekking van stoom. Met deze stoom wordt vervolgens in een stoomturbine elektriciteit geproduceerd. De bij de elektriciteitsproductie vrijkomende restwarmte kan tevens worden benut. In dat geval is sprake van warmte/kracht koppeling (WKK). Verder wordt verbranding van biomassa veel toegepast voor de productie van alleen warmte, bijvoorbeeld voor stadsverwarming of in de procesindustrie voor procesverwarming. Deze technologie wordt in allerlei vormen

commercieel toegepast, met name voor het verbranden van residuen uit de bosbouw (VS, Scandinavië). Het betreft een betrouwbare, bewezen techniek.

Figuur 3.5.2: Schematisch overzicht van mogelijke conversieroutes voor biomassa.



Meestoken of co-verbranding is het bijstoken van biomassa in onder meer kolencentrales. Hierbij gelden met name eisen aan de voorbehandeling. Het type centrale (bijvoorbeeld poederkool of roosteroven) waarin wordt bijgestookt bepaalt welke voorbehandelingstechnologieën (en mogelijke branders) zijn vereist en daarmee ook voor een belangrijk deel de additionele investeringskosten en het energieverbruik van de voorbehandeling.

Co-verbranding is met name op de korte termijn interessant aangezien met beperkte investeringskosten biomassa gestookt vermogen kan worden gerealiseerd met een relatief hoge efficiëntie (moderne kolencentrales: 40 à 43%). De bestaande elektriciteitsproductie- en rookgasreinigingssystemen kunnen hierbij worden gebruikt.

In biomassa of afval aanwezige verontreinigingen dienen uit de rookgassen te worden gehaald. Dit vraagt met name bij systemen die afval verbranden om uitgebreide

rookgasreinigingssystemen. Mooie voorbeelden hiervan zijn nieuwe afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) waarin de modernste reinigingssystemen worden toegepast.

Vergassing

De biomassa wordt bij een ondermaat aan zuurstof via een fysisch of chemisch conversieproces omgezet in een secundair synthesegas, bestaande uit koolmonoxide (CO) en waterstof (H₂), waarna het synthesegas wordt gereinigd. Omdat de te reinigen gasstroom een beduidend kleiner volume heeft dan bij verbranding kan de installatie compact gebouwd worden. De koolmonoxide en waterstof kunnen na reiniging op verschillende manieren worden benut. Om methanol, synthetisch aardgas, waterstof of andere vloeibare transportbrandstoffen te kunnen maken, dient men bij het vergassingsproces zuurstof of stoom te gebruiken als vergassingsmedium in plaats van lucht. Alleen dan wordt een juiste samenstelling van het synthesegas verkregen. De diverse omzettingsmechanismen worden nu kort behandeld.

- a) *Omzetting naar elektriciteit en/of warmte*: het brandbare gas kan worden verbrand in een gasmotor (WKK) of gasturbine, hetgeen elektriciteit en warmte oplevert. Het hete uitlaatgas uit de gasturbine kan vervolgens worden benut voor de productie van stoom en het aandrijven van een stoomturbine. Het elektrisch rendement neemt hierdoor toe. Restwarmte kan worden benut om eventueel natte biomassa te drogen tot het vereiste vochtgehalte voor vergassing (meestal 10 – 15%). Het totale concept van gasturbine met stoomturbine staat bekend als BV-STEG, ofwel geïntegreerde BiomassaVergassings-Stoom-en-Gas installatie. BV-STEG eenheden zijn nog niet commercieel toegepast. Met name de investeringskosten van BV-STEG systemen zijn nog onzeker. Op langere termijn is het waarschijnlijk dat verbeteringen in met name gasturbinetechnologie tot hogere overall elektrische rendementen en lagere specifieke investeringskosten zullen leiden.
- b) *Omzetting naar synthetisch aardgas (SNG)*: het gereinigde synthesegas (CO, H₂) wordt in een reactor omgezet in methaan (CH₄) en water (H₂O). Hiervoor zijn per molecuul CO drie moleculen H₂ nodig. Omdat de verhouding tussen CO en H₂ in het synthesegas vaak ongunstig is (minder H₂), vindt een tweede reactie plaats, waarbij een deel van de CO met water wordt omgezet in H₂ en CO₂ (water-gas shift). Men noemt de omzetting naar methaan ook wel methanisering. Als laatste stap volgt het opwerken van het methaan naar SNG, zodat het kan worden toegevoegd aan het aardgasnet. Groot voordeel van deze methode is dat gebruik kan worden gemaakt van de bestaande gasinfrastructuur en conversiesystemen, en dat het grootste deel van de in de biomassa aanwezige energie op de juiste plaats kan worden benut.
- c) *Omzetting naar methanol*: het synthesegas wordt eerst over een water-gas shift reactor geleid om een maximale concentratie waterstofgas te krijgen. Vervolgens wordt het gasmengsel over een bepaald type katalysator geleid, zodat een mengsel van methanol en water ontstaat. Per cyclus wordt een deel van het gas omgezet in methanol. Het niet gereageerde gas wordt gerecirculeerd. Via een destillatiestap wordt de methanol van het methanol / water mengsel afgescheiden. De methanol kan vervolgens worden ingezet als vervanger voor benzine in transport. Het omzettingsrendement van biomassa naar methanol ligt ca. tussen 55 % en 60%.

- d) *Omzetting naar waterstof*: het synthesesgas wordt eerst over een water-gas shift reactor geleid om een maximale concentratie waterstofgas te krijgen. Vervolgens wordt de waterstof van de koolmonoxide en het water gescheiden en tot de gewenste druk gecomprimeerd. De waterstof kan vervolgens als grondstof worden toegepast in (chemische) processen, elektriciteitsproductie (o.a. brandstofcellen!), (proces)verwarming (o.a. glasovens) en transport. Het omzettingsrendement ligt ca. tussen 60% en 65%.
- e) *Omzetting naar FT-benzine of FT-diesel*: met de Fischer Tropsch synthese⁹³ is het mogelijk om diesel, benzine en chemicaliën te produceren uit een synthesesgas. Het proces is al ruim 80 jaar oud (in 1923 ontdekt door Fischer en Tropsch). De gasvormige componenten CO en H₂ worden bij een hoge temperatuur met behulp van een katalysator omgezet in vloeibare producten als gasolie, nafta, kerosine, grondstoffen voor de chemische industrie en paraffinewassen. In een laatste stap worden de verschillende producten vervolgens gescheiden en vindt optimalisatie naar de gewenste eindproducten plaats. De producten zijn volledig vrij van zwavel en aromaten, dit in tegenstelling tot de conventionele brandstoffen uit aardolie. Gevolg is een veel schonere verbranding. De FT technologie is commercieel beschikbaar. Shell bijvoorbeeld heeft in Maleisië (Bintulu) een commerciële fabriek waar aardgas (via omzetting van aardgas naar synthesesgas van CO en H₂) wordt omgezet in zuivere diesel en hoogwaardige wassen.

De productie van methanol, waterstof, FT-benzine en FT-diesel uit schone synthesesgassen is technisch gezien geen probleem. Alle componenten zijn op de markt verkrijgbaar. Belangrijkste probleem is het beschikbaar krijgen van een schoon synthesesgas uit biomassa (stabiele vergassing) met constante samenstelling (ook bij fluctuerende biomassa-input) tegen een commercieel aantrekkelijke prijs.

De biomassavergassing bevindt zich nog in het ontwikkelstadium. De wereldmarktprijzen voor bestaande grondstoffen voor het synthesesgas zijn daarnaast zoveel lager dat de biomassaroute (hierboven aangegeven als b), c), d) en e)) voorlopig economisch nog niet haalbaar is.

Pyrolyse

Flash pyrolyse van biomassa is een proces waarbij biomassadeeltjes onder invloed van hoge temperaturen zonder toevoer van lucht worden omgezet in olie (60 – 75%), gas (10 – 15%) en kool (15 – 30%). De percentages verschillen enigszins per reactortype. Het hoofdproduct van flash pyrolyse processen is bio-olie, een product dat voor diverse doeleinden kan worden gebruikt. Bij langzame pyrolyse wordt met name houtskool geproduceerd. Pyrolyse-olie is enigszins instabiel waardoor zich technische problemen kunnen voordoen bij opslag, transport en toepassing van de olie. Door langdurige opslag kunnen samenstelling en fysische eigenschappen veranderen.

Pyrolyse-olie kan energetisch worden toegepast als brandstof voor ketels, stationaire dieselmotoren en gasturbines. Dit betreft zowel bijstook in elektriciteitscentrales als

⁹³ G.P. van der Laan, Kinetics, selectivity and scale up of the Fischer-Tropsch synthesis, proefschrift Rijksuniversiteit Groningen, 1999.

toepassing in WKK systemen. De bio-olie is in beginsel ook geschikt als transportbrandstof via bijmenging met dieselolie (micro-emulsie) voor rechtstreekse toepassing in dieselmotoren, via opwerking tot benzine- en dieseloliekwaliteit en als toevoeging aan dieselolie en benzines ter vervanging van methyl tertiair butyl ether, MTBE. Deze additief wordt aan benzine toegevoegd om het octaangehalte van de benzine (en daarmee de klopvastheid) van de benzine te verhogen. Een andere toepassingsmogelijkheid is thermisch en katalytisch kraken van de bio-olie, waardoor een synthesegas (CO, H₂) wordt verkregen. Dit synthesegas kan vervolgens worden opgewerkt naar aardgaskwaliteit en via het bestaande gasnetwerk worden gedistribueerd. Ook de productie van waterstof en methanol via bovengenoemde routes is dan mogelijk.

Pyrolyse staat in de belangstelling omdat de tussenproducten (bio-olie of bio-kolen) op diverse manieren kunnen worden ingezet voor de energie-opwekking. Bovendien wordt de energiedichtheid van de biomassa vergroot en is het product beter handelbaar dan het oorspronkelijke materiaal. Belangrijkste knelpunten bij de ontwikkeling zijn de opschaling van flash-pyrolyse reactoren en de onderlinge aanpassing van oliekwaliteit en conversieapparatuur. Geen enkele keten heeft het stadium van bench-scale bereikt. De ontwikkeling van de onderdelen van de keten is wel verder. Met name de ontwikkeling van flash-pyrolyse reactoren heeft het niveau van pilot scale inmiddels bereikt. Het netto rendement van de bestaande flash-pyrolyse systemen ligt iets onder de 70%.

Hydrothermale omzetting (HTU)

Net als flash-pyrolyse is hydrothermale omzetting een manier om olie van biomassa te maken. Bij hydrothermale omzetting worden de koolstofketens in een waterige omgeving bij hoge druk en temperatuur afgebroken. Het resultaat is een olie, ook wel "biocrude" genoemd. Deze biocrude kan vervolgens worden aangewend als stookolie in conventionele stoomcycli om elektriciteit op te wekken. Ook is het mogelijk om biocrude door katalytische hydro-deoxygenering met behulp van waterstof verder op te werken tot vloeibare of gasvormige transportbrandstoffen, bijvoorbeeld tot LPG, diesel of kerosine. Deze brandstoffen zijn ook geschikt voor stationaire gasturbines. HTU bevindt zich nog in het demonstratiestadium. Het netto energetisch rendement van het proces is waarschijnlijk hoog, ca. 90%.

Kosten van conversieroutes

Verbranding van biomassa, productie van stortgas, fermentatie van suikerhoudende biomassa en vergisting zijn commercieel bewezen technieken. Vergassing gecombineerd met elektriciteitsopwekking, SNG -, methanol -, of H₂ - productie verkeert nog in de ontwikkelingsfase. Belangrijkste aandachtsgebied vormen hierbij het via vergassing produceren van een synthesegas met een constante kwaliteit (ook bij wisselende biomassasamenstelling) en de gasreiniging. Ook snelle pyrolyse van biomassa en fermentatie van cellulosische biomassa verkeren nog in de ontwikkelingsfase. Gevolg hiervan is dat het moeilijk is om kosten van systemen onderling te vergelijken. Met name voor de systemen die zich nog in het ontwikkelstadium bevinden, kunnen alleen globale, verwachte kosten worden opgegeven. In een aantal gevallen zijn de kosten gebaseerd op 'papieren' studies. De opgegeven kosten lopen hierdoor sterk uiteen.

Een tweede onzekere factor vormen de kosten voor de te verwerken biomassa. Prijzen van productiehout (chips) liggen in Brazilië op ca. 1,5 – 2 €/GJ, in de VS en verschillende

gebieden van N.W. Europa op ca. 3 – 4 €/GJ^{94,95,96}. Voor reststromen bedraagt dit ca. 2,5 – 3 €/GJ. In het geval van afval betreft het een negatieve kostprijs (verwerkingskosten, betaald door de aanbieder van het afval). Hierdoor speelt ook het conversierendement van een systeem een belangrijke rol in de kostprijs. Een overzicht van rendementen en kostprijzen voor de conversieroutes is gegeven in tabel 3.5.2. De kostprijzen lopen sterk uiteen, mede door een variatie in kosten voor de biomassa, neveninkomsten en een verschil tussen werkelijke, huidige en verwachte toekomstige prijzen. De tabel geeft dan ook slechts een indicatie van het toekomstperspectief.

Vorbewerking van biomassa

Voordat de biomassa kan worden geconverteerd tot een vloeibare of gasvormige energiedrager, ondergaat het een voortraject. Dit bestaat uit een combinatie van de volgende stappen:

- Oogsten;
- Opslag;
- Verkleining (hakken, malen, e.d.);
- Vergroten (balen, briketteren, e.d.);
- Drogen (de index DS, die hieronder wordt gebruikt, betekent: Droge Stof);
- Transporteren.

Niet al deze stappen zijn altijd noodzakelijk, noch moeten ze in bovenstaande volgorde plaatsvinden. Het voortraject is tot op zekere hoogte van de conversieroute afhankelijk, maar vooral van het soort biomassa, de plaats waar de biomassa beschikbaar is, etc.

Het uiteindelijke doel is om biomassa zo kosten-effectief mogelijk om te zetten in nuttige energievormen. Bij het ontwerp van de verbewerkingketen vindt daarom per project een optimalisatie plaats van kosten en omzettingsrendementen. Van geval tot geval dient dit te worden uitgevoerd.

In tabel 3.5.3. zijn de globale kosten en energieverbruik van de verschillende verwerkingsstappen aangegeven, alsmede wanneer de betreffende stappen worden toegepast.

Keuze voor welke route?

Momenteel vinden discussies plaats over de route welke moet worden gekozen. Dit betreft onder meer een discussie over te toe te passen conversietechnologie, met name verbranden of vergassen, en voor welk doel de biomassa in te zetten: voor elektriciteitsproductie of voor het maken van (vloeibare) brandstoffen. De discussie wordt sterk bemoeilijkt doordat de diverse technologieën zich in een verschillend ontwikkelingsstadium bevinden. De kosteneffectiviteit van veel conversiesystemen dient sterk te verbeteren teneinde biomassa op de langere termijn een grote bijdrage te kunnen laten leveren aan de energievoorziening.

⁹⁴ UNEP, Bioenergy, Energy Technology Fact Sheet, www.uneptie.org/energy

⁹⁵ EUBIA, www.eubia.org, 2003

⁹⁶ World Energy Assessment, a.w.

Tabel 3.5.2: Globale rendementen en kosten voor verschillende conversieroutes^{97,98,99}

Conversieroute	Conversierendement [%]	Kosten
Verbranding - Warmte	>70 (thermisch)	7 €/GJ of 25€/MWh
Verbranding - Elektriciteit		
Grootschalig, Stand-alone	20 – 45 (elektr.)	6 – 8 €/ct/kWh
Bijstook kolencentrale ¹⁰⁰	30 – 45 (elektr.)	1 – 4 €/ct/kWh ¹⁰¹
Vergassing - Elektriciteit		
Kleinschalig, gasmotor	15 – 30 (elektr.)	10 – 15 €/ct/kWh
Grootschalig, STEG	40 – 55 (elektr.)	5 – 7 €/ct/kWh
Vergassing – Synthetisch Aardgas ¹⁰²	80 – 90	6 – 12 €/GJ
Vergassing – Methanol ¹⁰³	50 – 70	11 – 13 \$/GJ
		7 – 10 \$/GJ (long term)
Vergassing – Waterstof	55 – 70	8 – 10 \$/GJ
		6 – 7 \$/GJ
		9 €/GJ
Vergassing – FT Diesel		
Flash Pyrolyse – Bio-olie ¹⁰⁴	70	4 – 11 €/GJ
Langzame Pyrolyse – houtskool	70	80 € /ton of 4 – 6 €/GJ
HTU – Biocrude	90	6 €/GJ ¹⁰⁵
		3 – 4 €/GJ (long term)
Vergisting – Elektriciteit ¹⁰⁶		
Kleinschalig	10 – 15 (elektr.)	15 €/ct/kWh
Vergisting – Aardgas	30 – 50	
Opwerking		5 – 15 €/ct/m ³
Fermentatie – Ethanol		
Suiker	40 – 50	15 – 25 \$/GJ (biet); 8-10 \$/GJ (riet)
Cellulose	60 – 70	10 – 15 \$/GJ
Hout ¹⁰⁷	60 – 70	6 – 7 \$/GJ (long term)
Extractie – RME ¹⁰⁸	75	7 – 25 \$/GJ

⁹⁷ De Jager e.a., Kosten-effectiviteit van transportbrandstoffen uit biomassa, Ecofys / Novem, 1998.

⁹⁸ Simons e.a., CO2 neutrale gasvormige en vloeibare energiedragers uit biomassa in Europa, Stand der Techniek, Rapport 9904, BTG / Novem, GAVE, 1999.

⁹⁹ C. Daey Ouwens, Inzet van biomassa voor de productie van elektriciteit of voor vloeibare transportbrandstoffen, concept notitie, 2004.

¹⁰⁰ Grote variatie in rendement door type biomassa / afval, en toegepaste conversietechnologie. Bij een AVI lager rendement. Laatste getal betreft rendement dat op langere termijn kan worden gerealiseerd.

¹⁰¹ Betreft bijstook bij een reeds bestaande kolencentrale. Verschil voornamelijk door verschil in kosten voor de biomassa en levensduur van de betreffende centrale (beperkte tot geen afschrijving).

¹⁰² Kosten afhankelijk van schaalgrootte en kostprijs biomassa, laagste kosten na verdere doorontwikkeling en schaalvergroting. Meerkosten van opwerking van synthese gas naar aardgaskwaliteit tussen 1 – 2 €/GJ. De prijs van 12 €/GJ geldt voor een huidig systeem met een schaalgrootte van ca. 20 MW en een biomassaprijs van ca. 2,5 €/GJ. Bron: eigen berekeningen van de auteur.

¹⁰³ World Energy Assessment, a.w. noemt een beduidend hogere prijs voor 2010: 32 – 40 €/GJ voor bio-methanol uit respectievelijk geteelde biomassa en import biomassa. Voor waterstof geldt iets vergelijkbaars. De gegeven rendementen en kosten voor methanol, waterstof en FT Diesel zijn voornamelijk gebaseerd op papieren studies en bij grootschaliger toepassing wanneer commerciële technologie beschikbaar is.

¹⁰⁴ De laagste kosten gebaseerd op biomassakosten van 0 €/ton, de hoogste kosten gebaseerd op biomassakosten van 44 €/ton. Kosten zijn gebaseerd op schattingen van systemen bij commerciële toepassing op de langere termijn.

¹⁰⁵ De technologie bevindt zich nog in de lab-fase. De productiekosten zijn gebaseerd op papieren studies, waarbij rekening is gehouden met verdere schaalvergroting en leereffecten. De hoogste kostprijs zou moeten gelden voor een systeem van 130 kton_{DS} hout per jaar, en een houtprijs van 39 €/ton_{DS}.

¹⁰⁶ Ingeval van vergisting van mest wordt de structuur van de vergiste mest verbeterd en zijn de nutriënten (P, K, N, C) in de mest beter toegankelijk. Toepassing van kunstmest wordt hierdoor vermeden. Dit betreft zowel een besparing op energie als op nutriënten. De kostprijs voor energie uit de beide vergistingsroutes wordt mede bepaald door de negatieve kosten van mestverwerking.

¹⁰⁷ EUBIA, a.w. geeft een beduidend hogere kostprijs voor bio-ethanol uit houtachtige biomassa: van 30 – 49 €/GJ (0,6 – 1 € / liter) voor het jaar 2000 en 20 – 30 €/GJ (0,4 – 0,6 € / liter) in het jaar 2010. De hoogste kosten zijn voor getelde miscanthus en populier, en de laagste voor import hout.

Tabel 3.5.3: *Energieverbruik, kosten en inzet per type verwerkingsstap.*¹⁰⁹

Verwerkingsstap	Energieverbruik % stookwaarde biomassa	Kosten	Toepassing bij
Oogsten	1,5%	27 – 45 €/ton _{DS} / 10 –25% totale kosten energiegewassen	<ul style="list-style-type: none"> Energieteelten en landbouwresiduen Oogstvorm: stengels, chips, balen, pellets Technieken nog in ontwikkeling
Opslag	Buiten: 8 – 45% Hoge verliezen tgv rot, schimmel	Buiten: 2,5 – 17 €/ton _{DS} / 2 – 12% totale kosten Binnen: 7,5 – 25 €/ton _{DS} / 5 – 17% totale kosten	<ul style="list-style-type: none"> Overbruggen periode oogst – conversie buiten: met / zonder afdekking, binnen: schuur, silo Soms gecombineerd met droging Risico's: rotting, zelfontbranding, schimmels
Verkleinen	kleiner -> hoger energieverbruik Blokken: 3% Poeder<1mm: 19%	Blokken: 14 €/ton _{DS} Poeder: 90 €/ton _{DS}	<ul style="list-style-type: none"> Zagen (blokken>10cm), chippen / hakselen (chips 0,5 – 10cm), malen (poeder<0,5cm) Op plaats van oogst of aan ingang conversie Eisen conversie, eenvoudiger transport, handling
Vergroten	1 – 5 %	14 – 90 €/ton _{DS}	<ul style="list-style-type: none"> Balen, pelleteren / briketteren, agglomereren Voor betere stapelbaarheid, hogere bulkdichtheid - > lagere transport-, opslag- en handlingkosten
Drogen	10 – 15% bij beschikbaarheid atmosferische warmte / restwarmte geen extra verbruik	11 €/ton _{DS} bij drogen van 50 -> 15 massa %	<ul style="list-style-type: none"> Voor goede opslag (tegenaan rotten, broei) Voor verlaging transportkosten Eis conversiemethoden flash-pyrolyse, vastbed- vergassing, briketteren -> laag vochtgehalte Droging op plaats van oogst geprefereerd (mbv buitenlucht), bij voorkeur voor transport
Transporteren	Wegtransport 0,1-0,5% per 100 km Over zee (import) 2 – 14% (Estland, Uruguay)	Wegtransport 7 – 23 €/ton _{DS} (bij 25km, 15% natte biomassa) Over zee (import) 14 – 46 €/ton _{DS} (Estland, Uruguay)	<ul style="list-style-type: none"> Type transport afhankelijk van afstand Energiedichtheid heeft grote invloed op transportkosten (vochtgehalte, bulkdichtheid) Transportafstand in NL relatief laag. Voor 50 MW_{el} centrale gemiddelde transportafstand van 22,5% bij gebruik van 3% van omliggende land. Bij 100MW_{el} 32 km.

Op basis van de verwachte kostprijzen van een aantal conversieroutes bij grootschalige toepassing lijkt inzet van biomassa voor de energievoorziening een zinvolle route. Teneinde deze positie voor biomassa te bereiken, moet een aantal hordes worden genomen. De meeste kansrijke technologieën bevinden zich in het demonstratiestadium. Om te komen tot kosteneffectieve grootschalige inzet is daarom extra R&D, doorontwikkeling en demonstratie van de nieuwe technologieën nodig. De nu commercieel haalbare technologieën leveren een beperkte bijdrage aan de energievoorziening. De kosteneffectiviteit van deze technologieën is veelal gebaseerd op lage prijzen voor de biomassa (afval met een negatieve waarde, of biomassa reststromen met een lage kostprijs) en afgeschreven conversiesystemen. Een keuze voor de bestaande technologie betekent hiermee automatisch een keuze voor de korte termijn.

Bij de keuze van nieuwe technologieën dient te worden vermeden dat de weg naar mogelijk kansrijke nieuwe technologieën wordt afgesneden. Dit pleit derhalve voor zowel

¹⁰⁸ De productiecosten van methylester zijn sterk afhankelijk van de prijs van de grondstof. De huidige methylesterproductie uit oliezaden wordt gedreven door hoge landbouwsubsidies en door een overschot aan braakliggende grond. De kostprijs van RME is hierdoor sterk uiteenlopend. Recente schattingen komen neer op een kostprijniveau van ca. 7 €/GJ (0,3 €/liter RME), bij een jaarlijkse productie van 100 kton RME. Hierbij is verondersteld dat het bijproduct glycerine wordt verkocht voor 1.500 € per ton. Dit is zeer optimistisch. Glycerol van topkwaliteit levert ruim 1.900 €/ton op, ruwe glycerol uit de productie van biodiesel ongeveer 200 – 700 €/ton. Vanwege de relatief lage netto energie productie per hectare wordt van esters uit oliezaden voor de langere termijn minder verwacht.

¹⁰⁹ Siemons, a.w.

het toepassen van bestaande technologie waarmee een eerste bijdrage wordt geleverd aan het verder verduurzamen van de energievoorziening, als het ontwikkelen en toepassen van nieuwe technologieën waarmee op termijn een groter aandeel duurzame energie uit biomassa op kosteneffectieve wijze kan worden gerealiseerd. Hierbij zou in het begin zo veel mogelijk open moeten worden gelaten, waarbij diverse grootschalige en kleinschalige technologieën worden gestimuleerd. Teneinde een reële vergelijking tussen verschillende technologieën te maken voor de langere termijn, dient de vergelijking te worden gebaseerd op marktconforme prijzen voor biomassa (deze wordt natuurlijk hoger bij een grotere vraag naar biomassa) en vervangingsinvesteringen voor de conversiesystemen.

Elektriciteit of vloeibare brandstoffen

Sommige studies geven aan dat biomassa vooral moet worden ingezet voor elektriciteitsproductie, in het bijzonder het bijstoken van biomassa bij kolencentrales. Deze route is momenteel het goedkoopst, mede doordat de bestaande kolencentrales zijn afgeschreven. Dit betekent echter niet dat deze optie voor de toekomst de meest geschikte is wanneer een groter aandeel energie uit biomassa moet worden geleverd. In dat geval dient te worden geïnvesteerd in nieuw productievermogen, waardoor de kosten sterk omhoog gaan. Daarnaast is het de vraag of het wenselijk is om het lot van biomassa te verbinden met kolen. Vanuit milieuoogpunt is er een tendens om het gebruik van kolencentrales terug te dringen, waarmee ook de bijstookroute van biomassa in gevaar komt. Door alleen te kiezen voor de inzet van biomassa voor de elektriciteitsproductie wordt op de langere termijn de ambitieuze doelstelling voor energie uit biomassa waarschijnlijk niet gehaald.

Een argument voor de inzet van biomassa voor (vloeibare) brandstoffen is, dat biomassa de enige duurzame energiebron is, waarmee transportbrandstoffen kunnen worden geproduceerd (afgezien van waterstof uit duurzame energiebronnen). Voor de elektriciteitsproductie zijn wel alternatieven beschikbaar zoals zon en wind.

In het kader van het GAVE-programma¹¹⁰ is het perspectief van diverse CO₂-neutrale gasvormige en vloeibare brandstofketens in kaart gebracht¹¹¹. Voor de verschillende brandstofketens is een inschatting gemaakt van de meest kansrijke clusters. Conclusie was dat voor alle gasvormige en vloeibare brandstoffen CO₂-neutrale alternatieven ontwikkeld kunnen worden tegen redelijke kosten en die passen in Nederland. De volgens de studie meest kansrijke clusters zijn:

- Een ethanolcluster voor transportdoeleinden ter vervanging van benzine en sommige dieseltoepassingen;
- Een dieselcluster voor transportdoeleinden ter vervanging van fossiele diesel;
- Een waterstofcluster ter vervanging van aardgas.

Het ethanolcluster moet het mogelijk maken om op korte termijn voor relatief lage kosten benzine te vervangen. Hierbij wordt uitgegaan van twee verschillende ethanolketens,

¹¹⁰ Een door Novem in opdracht van de ministeries van VROM en EZ uitgevoerd programma. GAVE staat voor de inventarisatie en analyse van nieuwe GASvormige en Vloeibare Energiedragers.

¹¹¹ Thijssen et al., Samenvatting Analyse en evaluatie van GAVE-ketens, rapport 9908, Arthur D. Little / Novem – GAVE, 1999.

waarbij via verschillende processen uit cellulosische biomassa ethanol wordt geproduceerd als brandstof voor transportvoertuigen. Beide processen zijn volledig biologisch met een hoog rendement, en moeten leiden tot lage geïntegreerde productiekosten (18 – 58 € per vermeden ton CO₂). Door overschakeling van het wegtransport naar ethanol kan vervolgens een aanzienlijke CO₂ reductie worden gerealiseerd.

In het FT-dieselcluster worden met behulp van vergassingstechnologie dieselvervangende transportbrandstoffen gesynthetiseerd. Basisketen is de “Biomass FT diesel”, waarbij biomassa op basis van eucalyptus wordt vergast en vervolgens synthese naar diesel plaatsvindt op basis van het Fischer-Tropsch proces.

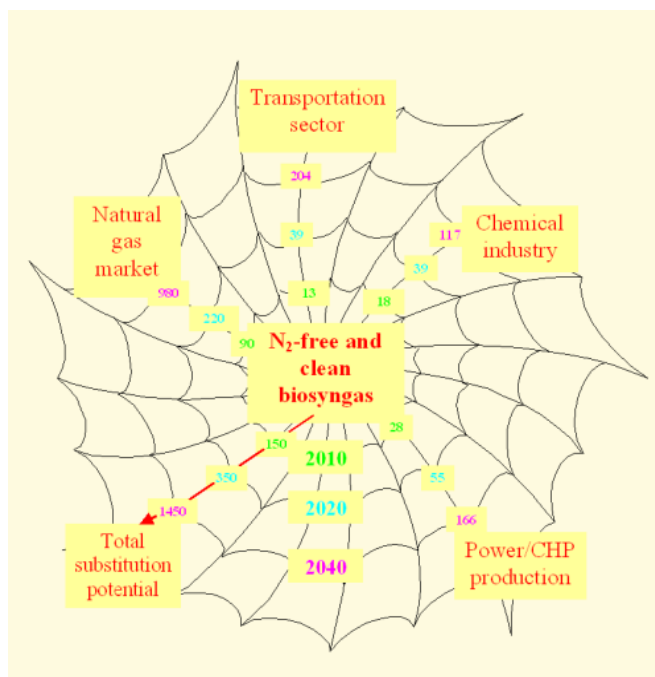
Het totale CO₂ reductiepotentieel van dit cluster is vergelijkbaar met het ethanolcluster, maar de verwachte kosten zijn aanzienlijk hoger (110 – 160 € per ton vermeden CO₂). Het lijkt waarschijnlijk dat de toepassing van deze keten wordt beperkt tot voertuigen die diesel gebruiken. Grootschalige implementatie van dit cluster lijkt het beste te kunnen plaatsvinden na de toepassing van het ethanolcluster.

Het waterstofcluster is exclusief gericht op de vervanging van aardgas voor verwarmingsdoeleinden (ook proceswarmte) voor huishoudens en industrie. Een belangrijke keten binnen dit cluster is de keten “Biomass compressed SNG”, waar biomassa op basis van eucalyptus wordt vergast waarna synthese van aardgas plaatsvindt. Het aardgas kan vervolgens in de bestaande infrastructuur worden ingevoerd. Hiermee is CO₂-reductie mogelijk, met behoud van de bestaande infrastructuur.

Verbranding versus vergassing

Op het moment dat wordt gekozen voor verbranding als conversiesysteem is alleen de inzet van biomassa voor de elektriciteitsvoorziening mogelijk. Op korte termijn, en voor bepaalde typen biomassa, is dit een goede oplossing, met name voor (verontreinigde) afvalstromen.

Om uit afval eindproducten via de vergassingsroute te maken is een schoon synthesegas nodig. Een deel van de in het afval aanwezige schadelijke componenten komt in het synthesegas



Figuur 3.5.3
Mogelijkheden voor vergaste biomassa in Nederland voor 2010, 2020 en 2040. De andere getallen geven de mogelijke energie opbrengst in PJ_{th}¹¹²

¹¹² <http://www.ecn.nl/biomassa/research/poly/index.en.html>

terecht. Het is de vraag of bij vergassing van het afval een voldoende schoon synthesesegas kan worden verkregen zonder dat beschadiging van de katalysatoren optreedt bij de omzetting van het synthesesegas naar het nuttige eindproduct (SNG, methanol, waterstof of andere biobrandstoffen). Verbranding, in combinatie met een uitgebreide reiniging, zoals in een moderne AVI plaatsvindt, lijkt voor het verwerken van (verontreinigde) afvalstromen daarom de meest geschikte route.

Vergassing lijkt een sleutelrol te spelen bij de inzet van (schone) biomassa uit energieteelt in de toekomstige energievoorziening. Via de vergassingsroute kunnen diverse eindproducten, zoals elektriciteit, transportbrandstoffen, synthetisch aardgas¹¹³, maar ook chemicaliën en synthetische producten worden geproduceerd. De route heeft hiermee een grote flexibiliteit, zoals is weergegeven in figuur 3.5.3. Het grootste knelpunt is het produceren van een schoon synthesesegas door vergassing van de biomassa. Is het synthesesegas eenmaal verkregen, dan kunnen bestaande commerciële technologieën worden toegepast om de gewenste eindproducten te produceren. Doorontwikkeling van de vergassingsroute ligt dan ook voor de hand.

Inzet vergisting

De inzet van vergisting lijkt vooral nuttig bij de verwerking van natte biomassastromen en nat afval, zoals mest en GFT. Het betreft een relatief goedkope verwerkingsoptie voor het afval. In het geval van mestvergisting wordt de kwaliteit van de mest verbeterd, waardoor deze beter dienst kan doen als meststof voor de landbouw, en de inzet van kunstmest wordt verminderd. Het geproduceerde biogas kan lokaal (op boerderijschaal) worden omgezet in warmte en elektriciteit. De warmte kan worden benut voor verwarming van de woning en stallen, terwijl overtollige elektriciteit aan het openbare net kan worden geleverd. Lokale omzetting van het biogas naar elektriciteit in een WKK leidt wel tot hoge NO_x emissies. Het voorkomen van deze verzurende emissies vergt aanvullende maatregelen. De kosten nemen hierdoor toe, terwijl het energetisch rendement omlaag gaat. Een alternatief is opwerking naar aardgaskwaliteit of inzet van het biogas als transportbrandstof. Deze routes zijn vooral aantrekkelijk wanneer de warmte lokaal niet goed kan worden benut en/of de additionele kosten voor de beperking van verzurende emissies onacceptabel hoog zijn.

Grootschalig versus kleinschalig

De meeste huidige omzettingstechnologieën zijn gebaseerd op grootschalige systemen. Een voorbeeld hiervan is vergassing, gevolgd door Fischer Tropsch synthese. Investerings- en ontwikkelkosten voor deze systemen zijn zeer hoog, en hierdoor alleen bereikbaar zijn voor een klein aantal zeer kapitaalkrachtige partijen. Wanneer alleen deze grootschalige biomassaroutes worden ontwikkeld, nemen bovengenoemde partijen in de

¹¹³ Ook het produceren van aardgas uit het synthesesegas is mogelijk interessant. Op deze manier kan gebruik worden gemaakt van het bestaande gasnet en de bestaande conversietechnologie en kan de energie bij de eindgebruiker met maximale efficiëntie worden omgezet in de gewenste eindproducten, warmte en elektriciteit. Zeker in combinatie met de ontwikkelingen op het gebied van micro-warmte kracht. Hierdoor is een geleidelijke overgang richting een duurzame energievoorziening mogelijk. Bij grootschalige productie van elektriciteit wordt of een deel van de in de biomassa aanwezige energie niet benut of, wanneer de warmte ter plaatse niet kan worden benut, via laag-efficiënte warmtenetten tegen hoge kosten verspreid naar eindgebruikers.

waardeketen de sterkste positie in, en kunnen hiermee de eisen stellen aan kwaliteit en kostprijs van de biomassa. De vraag is of hiermee lokale economieën zijn gediend, en of de lokale producenten van de biomassa (de boeren) voldoende sterk staan om een goede prijs voor de biomassa te krijgen. De druk op de kostprijs aan de productiezijde kan hierdoor toenemen, met als uiterste consequentie minder of zelfs onverantwoord produceren van biomassa voor energiedoeleinden. De biomassa wordt bij toepassing van deze grootschalige conversiesystemen op een beperkt aantal locaties omgezet naar brandstoffen (analoog aan raffinage van ruwe olie), waardoor de productie van de biomassa en toepassing hiervan in de energieketen zijn ontkoppeld. Daarnaast is het de vraag of de grootschalige route geschikt is voor de langere termijn, of dat meer decentrale inzet van biomassa nodig is.

Voor wereldwijde toepassing van biomassa lijkt, met name voor ontwikkelingslanden, een laagdrempelige lokale / decentrale productie van biomassa en omzetting naar nuttige energie noodzakelijk. Dit vraagt om kleinschalige initiatieven en integrale oplossingen voor diverse lokale partijen (boeren plus stakeholders in de omgeving). Het is nog onduidelijk in hoeverre grootschalige systemen kunnen worden gedownscaled, waardoor de conversiesystemen beter passen bij de schaalgrootte van de productie van de biomassa. Voorts is het twijfelachtig of de bestaande partijen die zich richten op grootschalige toepassingen in staat zijn kleinschalige oplossingen te ontwikkelen (analoog aan de introductie van de PC: niet door de mainframe fabrikant IBM, maar door toenmalig kleine partijen als Microsoft, Intel e.d.).

Teneinde lokale / decentrale oplossingen te ontwikkelen, moet een veelvoud aan (kleinschalige) initiatieven worden gestimuleerd, waarbij diverse spelers verschillende oplossingen ontwikkelen. In het juiste klimaat worden innovaties versterkt en de kans op nieuwe, betere oplossingen vergroot. Aangezien de grootindustrie weinig belang heeft om hier initiatieven te nemen, ligt hier een taak voor de overheid. De overheid dient hier vooral een stimulerende rol in aan te nemen en verschillende partijen in het beginstadium de mogelijkheid te bieden ontwikkelingen op te starten. Mogelijke oplossingsrichtingen zijn kleinschalige productie en inzet van ethanol, vergisting of andere routes die aansluiten bij kleinschalige systemen, zoals productie en transport van pyrolyse-olie, gevolgd door opwerking en conversie naar alternatieve energievormen.

Samenvatting en conclusies

Uitstoot

Omdat biomassa CO₂ neutraal is, wordt de CO₂ uitstoot ten opzichte van fossiele brandstoffen gereduceerd. Aanvullende reinigingsstappen zijn noodzakelijk (en verplicht) om overige emissies tegen te gaan. Bij biomassa uit energieteelt is het aandeel overige emissies (bij goede systeemcondities) zeer beperkt. Bij afval is dit aandeel groter en zijn uitgebreide reinigingsstappen essentieel.

Implementatie

Het ruimtebeslag van biomassaproductie (plantages) is groot. Voorwaarde is een verantwoorde inpassing, bijvoorbeeld op braakliggende gronden, waarmee de biodiversiteit zelfs kan worden vergroot. Het ruimtebeslag voor de conversiesystemen is vergelijkbaar met het ruimtebeslag voor conventionele systemen.

De geluidsoverlast voor de conversiesystemen is vergelijkbaar met de geluidsoverlast van bestaande systemen.

Horizonvervuiling is voor de conversiesystemen vergelijkbaar met de bestaande systemen.

Eerste voorwaarde voor maatschappelijke acceptatie is een verantwoorde, duurzame inrichting van de plantages en duurzame energieteelt (bodem, water) waarbij nieuwe natuur en recreatie wordt ontwikkeld. Tweede voorwaarde is schone omzetting van de biomassa naar nuttige energie (lucht).

Zekerheid

Door het diverse karakter van biomassa, verschillende soorten kunnen op veel plaatsen worden verbouwd, is er geen toevoerafhankelijkheid.

Door het decentrale karakter is het terrorisme risico laag en is er geen proliferatierisico. De weersafhankelijkheid is relatief beperkt.

De technologische eenvoud is verschillend per biomassatechniek. De technologie is niet zeer complex, en vergelijkbaar met bestaande systemen. Belangrijkste uitdaging is de reductie van de kostprijs van de technologie.

De inpasbaarheid in de bestaande infrastructuur is verschillend per type biomassa en gekozen route. Bij inzet van biomassa als vervanging van bestaande energievormen (elektriciteit, SNG, biodiesel, ethanol) is de inpasbaarheid goed tot zeer goed. Bij nieuwe brandstoffen als methanol en waterstof uit zijn ver(der)gaande aanpassingen aan de infrastructuur noodzakelijk.

Potentieel

In termen van vermeden CO₂ is dit hoog. Biomassa kan op termijn tot ca.40% van de totale energievoorziening voor haar rekening nemen.

Duurzaamheid

Ook over 200 jaar is biomassa als energiebron beschikbaar. Duurzaamheid geldt alleen onder strikte voorwaarden aan productie (geen uitputting, vervuiling) en conversie (minimalisatie emissies)

Ontwikkelingslanden

Stedelijke toepassing ontwikkelingslanden is voor afval goed. Voor overige biomassa per route verschillend. Rurale toepassing ontwikkelingslanden is goed bij decentrale inzet van biomassa. Geldt voor aantal mogelijke routes en brandstoffen.

Gelijkheid

De optie biedt mogelijkheden om tot een gelijkwaardige voetafdruk in termen van broeikasgasuitstoot te komen onder de voorwaarde van doorontwikkeling van lokale / decentrale productie van biomassa en bij gebruik van decentrale omzettingstechnologie naar nuttige energie.

Evaluatie

Biomassa kan een belangrijke bijdrage leveren aan de energievoorziening. Hiervoor dient echter nog veel te worden gedaan. Dit betreft zowel (het opstellen van criteria en starten van projecten voor) het duurzaam produceren van biomassa, als het doorontwikkelen van klein- en grootschalige technologie voor het omzetten van biomassa naar nuttige energie. In dit stadium zijn veel verschillende technologieën en eindproducten mogelijk.

Er is nog geen winnaar. Derhalve moet een speelveld worden gecreëerd waarin de verschillende technologieën en routes kunnen worden doorontwikkeld zonder andere routes uit te sluiten. Voor de grootschalige omzetting lijkt vergassing een sleutelrol te spelen. Daarnaast lijkt de ontwikkeling van decentrale routes van belang om biomassa wereldwijd, ook in rurale gebieden, te kunnen wegzetten.

3.6 Energie uit aardwarmte door Hendrik-Jan Bosch en Heleen de Coninck

'Geo (Earth) *thermal* (heat) energy' of in het Nederlands aardwarmte is de energie aanwezig onder het aardoppervlak dat (voornamelijk) door radioactief verval in gesteenten ontstaan is. Plaattektoniek, aardbevingen, ontstaan van gebergten en vulkanisme vinden hun oorzaak in het transport van warmte (conductie en convectie) van het binnenste van de aarde naar het oppervlak.

Ongeveer $8,5 \times 10^5$ PJ aan energie bereikt jaarlijks het aardoppervlak en er is ongeveer 43×10^9 PJ aan geothermische energie in de bovenste 3 km aanwezig (genoeg om het huidige energiegebruik voor 10.000 jaar in te vullen). Echter, slechts dan wanneer de energie wordt overgedragen aan waterhoudende lagen kan de geothermische energie worden benut.

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen hoog- en laag-energetische geothermische energie. Bij de hoog-energetische variant wordt water/stoom (warmer dan $150\text{ }^\circ\text{C}$) gebruikt voor elektriciteitsproductie. Bij de laag-energetische variant vindt directe inzet van warm water voor verwarmingsdoeleinden plaats bij bronnen met een temperatuur onder de $150\text{ }^\circ\text{C}$. Bepalend voor de bruikbaarheid van geothermische energie is de diepte van de waterhoudende lagen en de nabijheid van een afzetgebied (specifiek voor de laag-energetische variant).

Wereldwijd was er voor de hoog-energetische variant in het jaar 2000 ongeveer 7800 MW_e in gebruik; hiermee werd jaarlijks ongeveer 49 TWh (0.18 EJe) aan elektriciteit geproduceerd (VS, Filippijnen, Mexico, Italië, Japan, IJsland, enz.). Schattingen van de International Geothermal Association spreken van een realiseerbaar extra potentieel van 11 tot 22 duizend TWh per jaar. In Europa zou het potentieel bij gebruik van conventionele technologie 1830 TWh (of 6.6 EJe) per jaar bedragen¹¹⁴ waarvan op dit moment ca. 2,5 promille wordt gebruikt.

Het gebruik van geothermische energie voor de verwarming van o.a. gebouwde omgeving (grootschalige stadsverwarming, kleinschalige warmtepompsystemen) komt op ongeveer 190 EJ per jaar (USA, Zwitserland, Duitsland, China, enz.). Wereldwijd is er een groot potentieel van minstens 1,400,000 EJ. Deze cijfers zijn weer gebaseerd op schattingen van de International Geothermal Association.

Toekomstige ontwikkelingen

Technieken die elektriciteit ook uit laagwaardige warmte ($<100\text{ }^\circ\text{C}$) in plaats van slechts uit stoom kunnen genereren zullen interessant worden. Daarnaast zijn er ontwikkelingen gaande om gebruik te maken van aardwarmte wanneer er geen water en/of stoomhoudende lagen (aquifers) aanwezig zijn (Hot Dry Rock technieken).

¹¹⁴ Dickson, M and M. Fanelli, Hidden resources: power from geothermal energy, Renewable Energy World, July/August 2001, 211-217

In Frankrijk is men ver gevorderd met het boren van 3 buizen naar een hete rotslaag op 5 km diepte¹¹⁵. Door 2 van de buizen wordt koud water naar beneden gepompt, wat door de spleten en kieren in de hete rotslaag wordt verhit en door de derde buis omhoog gepompt. Dat water heeft een temperatuur van 200 °C en levert stoom en daarna stroom. De schatting is dat in EU-15 op deze manier jaarlijks 1 EJe aan elektriciteit kan worden opgewekt.

Kosten en milieugevolgen

Het toepassen van de hoog-energetische variant kan in veel gevallen concurreren met traditioneel opgewekte elektriciteit. De kosten worden geschat¹¹⁶ op 3 tot 12 \$ct/kWh. Het gebruik van de laagenergetische variant gaat gepaard met hoge investeringen en hoge transportkosten en het heeft daarmee een hoog investeringsrisico. De kosten hebben, net als bij andere (stads)verwarmingssystemen, te maken met het aanleggen van de infrastructuur.

Geothermische energie gaat gepaard met CO₂ uitstoot, die met het ondergrondse water omhoog komt. Deze CO₂ uitstoot is sterk locatiespecifiek en kan van 13 tot 380 gram CO₂/kWh bedragen. Een moderne gascentrale heeft een emissiefactor van ongeveer 365 g CO₂/kWh, dus in sommige gevallen kan geothermische energie worden opgevat als een niet-duurzame energiebron. Het is belangrijk om een locatie uit te zoeken met een lage CO₂ emissie. Naast CO₂ kan er waterstofsulfide (H₂S) vrijkomen, maar die emissies zijn inmiddels goed beheersbaar¹¹⁷.

Samenvatting en conclusies

Uitstoot

Broeikasgasuitstoot (CO₂) kan het gevolg zijn van de ondergrondse activiteiten. Uitstoot van andere schadelijke gassen vergt afvang, maar is beheersbaar.

Implementatie

Ruimtebeslag en geluidsoverlast zijn gering. Er is geen sprake van horizonvervuiling en de maatschappelijke acceptatie is groot.

Voorzieningszekerheid

De warmte wordt lokaal geproduceerd en gebruikt. Er is geen toevoerafhankelijkheid, weersafhankelijkheid, noch een terrorisme risico. Voor zover de voorraden niet diep zitten is de technologie eenvoudig en is de warmte goed naar de gebruiker te vervoeren.

Potentieel

Zowel voor de laag-energetische als de hoog-energetische variant (warmte of elektriciteit) is er veel potentieel voor geothermische energie, ook in Europa. Het is onduidelijk waarom er zo weinig wordt gerealiseerd.

Duurzaamheid

Deze bron is duurzaam, zolang er niet meer energie aan de voorraad onttrokken wordt dan er door conductie/convectie wordt toegevoegd en de locaties zo gekozen worden dat de CO₂ emissies minimaal zijn.

¹¹⁵ New Scientist, 3 April 2004, 23. Het betreft een gemeenschappelijk project van EU, Shell en Electricité de France

¹¹⁶ Barbier, E., Geothermal Energy: a world overview. Renewable energy world, July 1999, pp.149-155

¹¹⁷ Barbier, E., Geothermal Energy: a world overview. Renewable energy world, July 1999, pp.149-155.

Ontwikkelingslanden

Het gebruik van geothermische energie voor verwarmingsdoeleinden is het meest doelmatig in de nabijheid van stedelijk gebied. Voor grootschalige elektriciteitsopwekking zijn afzetmogelijkheden in landelijke gebieden minimaal.

Gelijkheid

In de landen met een groot potentieel voor geothermische energie (veelal ontwikkelingslanden) kan het een belangrijke bijdrage leveren aan de energievoorziening.

3.7 Waterstof als energiedrager door Egbert Boeker en Rokus Wijbrans

Waterstof is een van de mogelijke producten waarin biomassa kan worden omgezet (zie hoofdstuk 3.5). Bij de waterstof-economie gaat het om méér dan het gebruiken van een chemische stof, het begrip duidt een inrichting aan van de industriële samenleving, waarbij waterstof een centrale rol als energiedrager overneemt van fossiele brandstoffen.

De waterstofeconomie staat in het nieuws omdat olie dreigt op te raken en benzine en dieselolie dan snel duurder zullen worden. Er is op termijn een andere brandstof nodig voor de transportsector (personenauto's en vrachtwagens, scheepvaart en luchtvaart), waarvoor waterstof een van de opties is. De meegenomen waterstof wordt in een brandstofcel omgezet in elektriciteit en die wordt weer gebruikt voor aandrijving van het voertuig door middel van elektromotoren.

Een tweede reden voor de interesse in de waterstofeconomie is dat waterstof gebruikt kan worden als opslagsysteem voor elektriciteit: bij overvloed aan elektriciteit is wordt waterstof geproduceerd, die daarna bij gebrek aan elektriciteit daarin terug omgezet kan worden in een brandstofcel. Die elektriciteit kan dan gebruikt worden in woningen en gebouwen of in de industrie. Dit is met name van belang voor weersafhankelijke energiebronnen, zoals windenergie.

Ten slotte spreekt de elegantie van de waterstofroute veel mensen aan. Bij het omzetten van de waterstof met zuurstof ontstaat immers alleen water als restproduct. De waterstof zelf kan op een stille en schone manier worden geproduceerd uit zonlicht. Het resultaat is een gesloten, onuitputtelijk energiesysteem, zonder CO₂ emissies, maar ook zonder emissie van andere vervuilende stoffen, zoals roet, stikstofdioxide en zwavel.

De brandstofcel, waarin waterstof wordt omgezet in elektriciteit, kan werken met heel weinig uitstoot van schadelijke stoffen. Bij de productie van de waterstof kunnen die, afhankelijk van het procédé, wel vrij komen. Hieronder bespreken wij achtereenvolgens de productie van de waterstof voor de cel, de brandstofcel zelf en mogelijke toepassingen in de Nederlandse transportsector. In kadertjes geven wij de visies van enkele opinieleiders op de waterstofeconomie en in een bijlage gaan wij na in hoeverre die visies binnen Nederland gerealiseerd zouden kunnen worden.

Als brandstof voor de brandstofcel komen, technisch gesproken, in aanmerking waterstof en methanol of ethanol, maar ook aardgas (methaan), propaan, diesel en andere vloeibare brandstoffen¹¹⁸. De methanol en ethanol kunnen evenals waterstof worden gemaakt uit biomassa en worden dan aangeduid als biobrandstoffen, zoals besproken is in hoofdstuk 3.5. Wij concentreren ons in dit hoofdstuk tot waterstof. Voor details verwijzen wij naar de literatuur^{119, 120, 121}.

¹¹⁸ In deze gevallen dient gebruik te worden gemaakt van een 'reformer', waarmee de betreffende brandstof wordt omgezet in waterstof en CO₂. Dit kan zowel een interne reformer zijn (bij een SOFC) als een externe reformer (bijvoorbeeld voor de PEM-cel).

¹¹⁹ John R. Wilson and Griffin Burgh, 'The Hydrogen Report', An Examination of the Role of Hydrogen in Achieving US Energy Independence, July 2003 (www.tmgtech.com).

¹²⁰ R. A. Wijbrans e.a., Waterstofinzet in de hedendaagse gasvoorziening, deel B, Gastec, 1997-intern rapport GL/970295/Wns/038

¹²¹ D. Hart e.a., Hydrogen-today and tomorrow, IEA Greenhouse Gas R & D Programma, April 1999

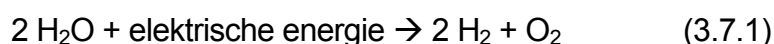
Bij het gebruik van waterstof als energiedrager kan men onderscheiden tussen de *productie* van waterstof, het *vervoer* van waterstof naar de plaats van gebruik en het *omzetten* van waterstof in mechanische of elektrische energie. Deze punten gaan we achtereenvolgens na.

Productie van waterstof

Uit het oogpunt van hernieuwbare energie komen alleen productie via elektrolyse van water met duurzame elektriciteit en productie uit biomassa in aanmerking. Maar we bespreken ook productie uit fossiele brandstoffen, omdat dat in de discussie een rol speelt en als tussenstap zou kunnen dienen op weg naar een waterstofeconomie.

Waterstof uit elektrolyse

Elektrolyse is de splitsing van water¹²² door er een elektrische stroom doorheen te voeren via de reactie



Dit proces is eenvoudig en maakt gebruik van gelijkstroom (wisselstroom moet worden gelijkgericht met 10% energieverlies). Het is 'zonde' om de zuurstof in de lucht te laten verdwijnen, dus zal het, waar mogelijk, voor gebruik in de industrie worden ingezet¹²³. De efficiency van proces (3.7.1) kan oplopen tot 90 %¹²⁴. Op basis van elektriciteitsprijzen in de VS, geproduceerd in fossiele centrales, lopen de prijzen van waterstof van \$20 (1997) tot \$50 (2003) per GJ¹²⁵.

Kosten bij elektrolyse

Energiekosten per GJ

De elektrische energie die bij (3.7.1) links in gaat, komt er rechts uit als chemische energie. Het absolute fysische minimum voor productie per GJ is derhalve $(10^9 / (10^3 \times 3600))$ kWh = 277 kWh elektrisch^{126, 127}. Essoscope¹²⁸ geeft een efficiency van max 70 % voor proces (1). Dan kost het dus 400 kWh e aan energie¹²⁹. Bij een rendement van 90

¹²² Het water wordt geleidend gemaakt door er een zout (elektrolyt) aan toe te voegen.

¹²³ Een interessante mogelijkheid is de 'oxyfuel combustion' van steenkool, genoemd in hoofdstuk 4.2. Steenkoolverbranding geeft dan een grote concentratie CO₂, die relatief gemakkelijk is af te vangen.

¹²⁴ Hydrogen Systems (dhr Vander Borre) claimde in een lezing (Technische Middag Nuon, 13 oktober 1999) een maximaal rendement van 90%. Binnen het Euro Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project wordt een elektrolyser rendement van 74% genoemd.

¹²⁵ 1 GJ = 10⁹ J; zie verder Wilson and Burgh, a.w. pag 16/17

¹²⁶ Een elektrische kWh wordt dikwijls, om misverstand te voorkomen, voorzien van een extra e, dus als kWh_e.

¹²⁷ Dit geldt bij kamertemperatuur. Bij hoge temperatuur elektrolyse (ca. 800 °C) wordt een deel van de benodigde energie door de warmte geleverd, waardoor een lager elektrisch vermogen nodig is.

¹²⁸ Zuinige auto's hebben de toekomst, Essoscope 1998, pag 12-15; Wilson and Burgh, a.w. pag 13.

¹²⁹ Wilson and Burgh, a.w., p13 verwijzen naar de elektrolyse in Noorwegen en Canada met energiekosten van 60 MWh voor 1000 kg H, dat is 420 kWh_e voor 1 GJ H. (1 kg H₂ = 500 mol → 500 x 285.8 kJ = 0.143 GJ) In essentie hetzelfde getal als Essoscope.

%, haalbaar na verdere ontwikkeling¹³⁰, bedragen de energiekosten 310 kWh per GJ waterstof.

Kosten per GJ in geld

Wij geven twee berekeningen voor de kosten van elektrolyse in € per GJ waterstof. Eerst een conservatieve schatting, die overeenkomt met de huidige praktijk en daarna een schatting gebaseerd op verdere ontwikkeling.

Bij de conservatieve schatting gaan wij uit van 400 kWh elektrische energie tegen een prijs van 4 ct/kWh. Dat geeft 16 € aan energiekosten. De gangbare prijs van waterstof ligt in de buurt van 30 €/GJ. Het verschil is toe te schrijven aan kapitaalkosten, onderhoud en bediening en winstmarge. De laatste achten wij inbegrepen bij 'overige kosten'. Dat leidt tot de formule

$$\text{prijs per GJ uit elektrolyse} = 400 \times \text{prijs kWh} + 14 \text{ \$ overige kosten} \quad (3.7.2a)$$

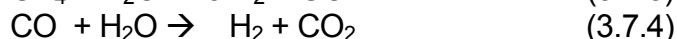
Een schatting voor de toekomst gaat uit van 310 kWh aan elektrische energie en een grote (500 MW) installatie voor de elektrolyse. Kapitaalkosten bedragen 4 €/GJ en onderhoud en bediening en winst nog eens 1 €/GJ¹³¹. Dat leidt tot de formule

$$\text{prijs per GJ uit elektrolyse} = 310 \times \text{prijs kWh} + 5 \text{ € overige kosten} \quad (3.7.2b)$$

De auteurs achten het onwaarschijnlijk dat de prijs nog veel lager kan worden dan aangegeven in formule (3.7.2b). In de literatuur zijn echter ook lagere kosten te vinden¹³².

Waterstof uit fossiele brandstoffen

Zowel kolen als aardgas (methaan) kunnen worden gebruikt voor productie van waterstof. Kolen moeten worden vergast, en zullen verder worden behandeld bij de paragraaf "Waterstof uit biomassa of kolen". Methaan met stoom bij 1000 °C reageert in 2 stappen, die elk waterstof opleveren:



Als dit CO₂ vrij moet worden gedaan, moet de CO₂ worden afgevangen en opgeslagen. Deze methode spaart geen fossiele brandstof maar is nog wel het goedkoopste manier voor het produceren van waterstof: \$ 5.6 (1997)¹³³ per GJ (zonder CO₂ opslag). Ook met CO₂ opslag is het nog goedkoop omdat de CO₂ alleen nog maar hoeft te worden gecomprimeerd om te worden opgeslagen in een geologisch reservoir.

¹³⁰ In studie is elektrolyse over een protonen geleidend polymeer membraan.

¹³¹ Berekeningen uit 1989, geciteerd in Wijbrans, a.w., p. 26

¹³² Dennis Anderson and Matthew Leach, *Energy Policy* 32 (2004) 1603-1614. Zie tabel 2, waar de kosten van electrolyse in het hele waterstofsysteem worden geschat op 1.5 ct/kWh, die volgens die auteurs nog gehalveerd kan worden.

¹³³ Wilson and Burgh, a.w., pag 16

In het zogenaamde CB&H proces¹³⁴ wordt gebruik gemaakt van plasmascheiding. Netto gaat dat volgens de reactie



Men mist energie omdat de koolstof, de C, niet wordt verbrand, maar men wint aan klimaatveiligheid. Want er komt geen CO₂ vrij. De koolstof (C) is chemisch hetzelfde als grafiet, kan makkelijk worden opgeslagen en op een later tijdstip, eventueel honderden jaren later, worden verwerkt in kunststoffen of desnoods verbrand tot CO₂. De beslissing daarover kan worden genomen door de komende generaties.

Beide aardgasprocessen (3.7.3)/(3.7.4) of (3.7.5) kunnen worden ingezet in een overgangperiode naar een volledig duurzame energievoorziening. Binnen de aardgasopties gaat de voorkeur van de auteurs uit naar (3.7.5)

Waterstof uit biomassa of kolen

Als biomassa als grondstof wordt gebruikt, kan deze¹³⁵

- afkomstig zijn van restproducten van land- en tuinbouw etc.
- speciaal voor het doel van waterstofproductie zijn gekweekt

De biomassa wordt bij hoge temperatuur (600 °C tot 1800 °C) toegevoerd aan een vergasser, waar H, CO en CH₄ worden geproduceerd.

De droom van Jeremy Leggett

"PV cells are becoming more efficient all the time. You could store the energy they provide in advanced batteries or by making hydrogen for fuel cells of the kind car manufacturers are developing. When your home is your power plant, generating electricity for your appliances and hydrogen for your heating and car, you no longer need to rely on utilities or oil companies."

Bron: New Scientist, 6 September 2003, 23

Met kolen kan hetzelfde worden gedaan, maar tegen lagere kosten, aangezien kolen goedkoper verkrijgbaar zijn en kolen homogener van samenstelling zijn, wat de vergassing vergemakkelijkt. Het resultaat is in beide gevallen synthesesgas, dat behandeld kan worden met processen als (3.7.3), (3.7.4) en (3.7.5). De energie in de biomassa wordt zo voor een fractie f omgezet in de chemische energie van waterstof. Die fractie kan worden geschat op $f = 0.57$ ¹³⁶. De kosten liggen naar verwachting tussen 7 €/GJ en 15 €/GJ waterstof¹³⁷. Bij kolen liggen de productiekosten lager, maar moet voor CO₂ vrije waterstof het CO₂ worden afgescheiden en opgeslagen. De kosten liggen in de orde van productie van

¹³⁴ Wijbrans, a.w., pag 43/44

¹³⁵ Voor deze paragraaf zie Wijbrans, a.w., pag 33-40. Deze bron geeft nog andere, meer geavanceerde methoden die wellicht goedkoper kunnen zijn.

¹³⁶ J. Wolf e.a., Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bio energy, Agricultural Systems, 76 (2003) 841-861 gebruikt een energie inhoud van biomassa als 18 MJ/kg; Wijbrans, a.w. pag 40 geeft 800 liter (800/22.4 mol = 10.2 MJ) H₂ voor 1 kg biomassa. Samen leidt dit tot $f = 0.57$.

¹³⁷ Wijbrans, a.w., pag 40, gebaseerd op 'papieren' studies.

waterstof via aardgas (zie vorige paragraaf).

Hoewel elektrolyse een efficiency kan bereiken tot 90 % moet die elektriciteit eerst worden geproduceerd. Die stap wordt bij productie van waterstof uit biomassa of fossiele brandstoffen overgeslagen.

Een nadeel van biomassa is dat het volumineus is. Als de biomassa wordt geproduceerd in de buurt van waterwegen, dan kan het vervoer over rivieren en zeeën verlopen en kan de biomassa in de buurt van industrieën worden verwerkt tot waterstof. Wordt de biomassa ver van massa-transportwegen gekweekt, dan kan de verwerking tot waterstof in een groot aantal kleinere eenheden goedkoper zijn dan in een klein aantal grotere. De biomassa zou ook in andere energievormen (pyrolyse-olie, SNG, methanol) kunnen worden getransporteerd, en vervolgens decentraal worden omgezet naar waterstof.

Nieuwe technologie

Van de diverse nieuwe technologieën, die nog in het researchstadium verkeren, noemen wij photolyse. Dit proces maakt evenals PV systemen gebruik van Si kristallen. De opgewekte elektrische potentiaal wordt rechtstreeks omgezet in chemische energie door water te splitsen¹³⁸. De tussenstap PV naar elektrische stroom en daarna elektrolyse wordt overgeslagen, wat kan leiden tot grotere efficiency.

Prijsvergelijking

Op basis van formules (3.7.2a) en (3.7.2b) kan men de prijs van waterstofproductie via verschillende processen met elkaar vergelijken. Dat gebeurt in tabel 3.7.1. Om het nog concreter te maken geven we ook de brandstofkosten om 12 kilometer te rijden, omdat dat correspondeert met 1 L benzine, waarvan de prijs bekend is^{139 140}. Voor de verbrandingsmotor is de huidige efficiency van 20 % genomen en voor de brandstofcel de gerealiseerde efficiency van 55 % (zij het tegen hoge kosten).

Transport van waterstof is niet als kostenfactor meegeteld. De fossiele kWh prijzen voor elektra worden gegeven voor overdag (5 ct/kWh_e) en 's nachts (2 ct/kWh_e) en die voor zon, wind en biomassa zijn geschat op basis van de betreffende hoofdstukken.

Conclusie: als alleen naar de brandstofprijs wordt gekeken en duurzame waterstof matig of niet wordt belast, dan kunnen duurzame alternatieven concurrerend zijn, qua prijs 'af fabriek'. Van de hernieuwbare energiebronnen is vergassing van biomassa economisch het meest aantrekkelijk. Bij zon en wind is waterstof vooral van belang als opslagmedium voor elektriciteit¹⁴¹.

¹³⁸ http://www.nrel.gov/education/pdfs/k_varner.pdf

¹³⁹ 1 Liter benzine heeft een energie-inhoud van 33.5 MJ (table 2). Met een efficiency van de benzinemotor van 20 % wordt 6.7 MJ effectief gebruikt. De brandstofcel heeft een efficiency van 55 %, dus aan waterstof nodig $6.7/0.55 = 12$ MJ. De prijs per GJ moet dus worden vermenigvuldigd met 0.012

¹⁴⁰ Zie Lawrence D. Burns e.a., Vehicle of Change, Scientific American, October 2002, 41-49 voor de efficiency van de brandstofcel.

¹⁴¹ Zie ook Anderson and Leach, a.w.

Tabel 3.7.1 Prijs van waterstof per GJ bij verschillende elektriciteitskosten. En kosten aan **brandstof** om een afstand van 12 km af te leggen. Aangenomen is dat op waterstof geen belasting wordt geheven. Voor elektrolyse worden twee schattingen gemaakt, de ene gebaseerd op de huidige praktijk (3.7.2a) en een die technologisch haalbaar wordt geacht (3.7.2b). Voor vergassing van biomassa worden prijsuitersten aangegeven.

	prijs in €/kWh	prijs in €/GJ H (3.7.2a)	prijs in €/GJ H (3.7.2b)	brandstof 12 km auto rijden in € (3.7.2a)	brandstof 12 km auto rijden in€ (3.7.2b)
elektra uit fossiel overdag	0.05	34		0.41	
elektra uit fossiel overdag	0.05		20		0.24
elektra uit fossiel des nachts	0.02	22		0.26	
elektra uit fossiel des nachts	0.02		11		0.13
elektra uit stoken biomassa	0.09	50		0.60	
elektra uit stoken biomassa	0.09		33		0.40
elektra uit wind	0.09	50		0.60	
elektra uit wind	0.09		33		0.40
elektra uit PV	1.00	414		4.97	
elektra uit PV	1.00		315		3.78
H uit vergassing biomassa		7-15	7-15	0.08-0.18	0.08-0.18
H uit kraken aardgas		6	6	0.07	0.07
H uit kolen met CO ₂ -opslag		6	6	0.07	0.07
benzine zonder belasting				0.25	0.25
benzine belast				1.20	1.20

Vervoer en distributie van energiedragers

Waterstof is een energiedrager. Het moet worden geproduceerd, vervoerd en omgezet in een nuttige toepassing, zoals een draaiende motor. Eventueel kan dat nog via de

¹⁴² 1 Liter benzine heeft een energie-inhoud van 33.5 MJ (table 2). Met een efficiency van de benzinemotor van 20 % wordt 6.7 MJ effectief gebruikt. De brandstofcel heeft een efficiency van 55 %, dus aan waterstof nodig $6.7/0.55 = 12$ MJ. De prijs per GJ moet dus worden vermenigvuldigd met 0.012

¹⁴³ Zie Lawrence D. Burns e.a., Vehicle of Change, Scientific American, October 2002, 41-49 voor de efficiency van de brandstofcel.

¹⁴⁴ Zie ook Anderson and Leach, a.w.

tussenstap van elektriciteit. Elektriciteit is eveneens een energiedrager, en ook fossiele brandstoffen en biomassa kunnen gezien worden als energiedragers.

Welke energiedrager in welke situatie moet worden ingezet is een kwestie van systeemplanning. Bij die planning speelt de energie-inhoud van diverse energiedragers een doorslaggevende rol. De energie-inhoud van enkele relevante energiedragers is in tabel 3.7.2¹⁴⁵ weergegeven. Wij nemen als maat de energie per liter, omdat het volume van de energiedrager dikwijls belangrijker is dan het gewicht. Wij vergelijken waterstof, biomassa en benzine als energiedragers¹⁴⁶. De andere gegevens in de tabel zijn toegevoegd als vergelijkingsmateriaal. Evenals in tabel 3.7.1 zijn de huidige efficiencies van verbrandingsmotor en brandstofcel genomen en is niet gekeken naar efficiencyverhoging of naar de kosten om de motoren te produceren.

Tabel 3.7.2 Energie-inhoud van enkele energiedragers in MJ/L (= 10⁶ J/ Liter)

brandstof	druk	energie-inhoud/ (MJ/L)	km per auto op 1 Liter
benzine	1 atmosfeer = 1 bar	33.5	12
ethanol (alcohol)	1 bar	21.2	
H ₂ gas	1 bar	0.013	0.01
H ₂ gas	200 bar	2.5	2.5
H ₂ gas	800 bar	10.2	10
H ₂ vloeibaar	14 bar bij – 240 °C	10.0	9.9
1 liter water op 100 meter hoogte ¹⁴⁷		0.001	
perslucht ¹⁴⁸	200 bar	0.0065	
biomassa droog ¹⁴⁹		≈ 9	
loodaccu		0.3	

Waterstof als energiedrager

De energie-inhoud per liter waterstof is zelfs onder hoge druk duidelijk lager dan dat van benzine of ethanol. Om een redelijke hoeveelheid energie te vervoeren zal de waterstof moeten worden samengeperst, of vloeibaar gemaakt. Ook dan houdt men relatief grote volumina, vanwege de ruimte die de tank in beslag zal nemen. Het vloeibaar maken van waterstof kost 30 % van de energie-inhoud en het zal lastig zijn om dat weer terug te krijgen in een andere vorm dan warmte.

¹⁴⁵ De gegevens voor waterstof zijn ontleend aan Wilson and Burgh, a.w., p. 23.

¹⁴⁶ Andere gangbare brandstoffen zijn nog CNG= samengeperst aardgas heeft bij 200 bar een energie-inhoud van 8.4 MJ/L en LNG=vloeibaar aardgas bij 1.4 bar en –114 °C een energie-inhoud van 20.3 MJ/L. Bron: Wiley Encyclopedia of Energy and the Environment, Wiley 1997, p. 1445

¹⁴⁷ De potentiële energie van 1 liter water op 100 meter hoogte is van belang voor het bedrijven van waterkrachtcentrales. Bedenk dat bij waterkracht vele 1000-en liters per seconde naar beneden storten en turbines aandrijven.

¹⁴⁸ Dit is de zogenaamde 'beschikbare arbeid' of exergie.

¹⁴⁹ Wolf, a.w. hanteert 18 MJ/kg. De biomassa zal echter niet compact kunnen zijn, vandaar dat hier is ondersteld dat 1 L een halve kg weegt.

Waterstof is het kleinste molecuul in de natuur; het lekt makkelijk weg, dus speciale voorzieningen (meer dan bij andere gassen) zijn nodig bij pompen, buizen, kleppen en lassen. Daarnaast zorgt de inwendige weerstand van waterstof bij transport als gas in buizen voor verlies aan kinetische energie. Per 150 km buis verliest men 1.4 % van de energie inhoud. Bij productie en consumptie van waterstof binnen Nederland levert dit geen problemen op. Er liggen al kilometers waterstof-pijpleidingen in het Rijnmond gebied.

Voor gebruik in auto's, vrachtwagens en bussen zal men de waterstof in het vehikel moeten meenemen. De afstand die men per auto kan afleggen met een tank van 1 liter is

***Het visioen van Romano Prodi,
president van de Europese Commissie,
16 juni 2003***

"It is our declared goal of achieving a step-by-step shift towards a fully integrated hydrogen economy, based on renewable energy sources, by the middle of the century. ---- We want to make up a special effort to step up progress towards using renewable-energy technologies and the extraction of hydrogen from water and biomass."

Persbericht EU, via <http://europa.eu.int/>

aangegeven in de laatste kolom van tabel 3.7.2. Het is duidelijk dat men voor personenauto's speciale tanks nodig heeft, die de hoge drukken en eventueel lage temperaturen van tabel 3.7.2 kunnen opvangen. Druktanks worden al op grote schaal gebruikt bij auto's die rijden op LPG of CNG¹⁵⁰. Maar drukken tot 800 bar komen daar niet voor. Vanwege de lage energiedichtheid van gasvormig of vloeibaar waterstof wordt er daarom hard gewerkt aan andere opties, waaronder waterstof opslag in materialen of gasvelden.

Waterstof opslag in materialen

Er bestaan metaalhydriden, die

waterstof opnemen bij lage temperatuur en afstaan bij iets hogere temperatuur¹⁵¹. Voor gebruik in een automobiel moet dit proces heel vaak kunnen plaats vinden zonder dat de hydriden beschadigen. Dit proces bevindt zich nog in het onderzoeksstadium, evenals vergelijkbare processen.

Waterstof opslag in gasvelden

Als waterstof vooral wordt gebruikt om de elektriciteit uit zon en wind op te slaan, kan men denken aan de opslag in lege gasvelden. Eventueel kan men ook halfllege gasvelden bijvullen met waterstof. Of men kan waterstof opslaan in diepe zoutlagen¹⁵². De geologische locaties die kunnen worden gebruikt voor waterstofopslag kennen parallellen met die voor opslag van gas, zoals dat al jaren gebruikelijk is in Nederland en de rest van Europa. Het voordeel is dat deze manier van waterstofopslag zou kunnen dienen om de wisseling der seizoenen te overbruggen.

¹⁵⁰ Compressed Natural Gas (CNG). Om luchtverontreiniging te voorkomen wordt dit in veel metropolen in ontwikkelingslanden ingezet voor taxi's en bussen. CNG heeft druktanks op 200 bar en LNG van 1.4 bar maar geïsoleerd vanwege de lage temperatuur van -114 °C.

¹⁵¹ Een General Motors Groep geeft an dat momenteel temperaturen van 150 °C tot 300 °C nodig zijn om de waterstof uit de metaalhyride te krijgen. Dat geeft te veel verliezen. Die temperatuur moet omlaag naar 80 °C, ook mag het 'tanken' niet langer duren dan 5 minuten: Lawrence D. Burns e.a., Vehicle of Change, Scientific American, October 2002, 41-49

¹⁵² Anderson and Leach, a.w.

Biomassa als energiedrager

Uit tabel 3.7.2 blijkt dat biomassa een redelijke energie inhoud heeft. Zoals eerder aangegeven zal het afhangen van de aanwezige of geplande infrastructuur op welke plek men de biomassa zal verwerken.

Elektriciteit als energiedrager

In tabel 3.7.2 komt elektriciteit niet voor als energiedrager. Een elektrische stroom kan niet stilstaan, en bij een overmaat aan stroom zal elektriciteit moeten worden opgeslagen in een andere energiedrager, bijvoorbeeld een van de in tabel 3.7.2 genoemde. Toch kan elektriciteit een goed en schoon middel zijn om energie te vervoeren. De transportverliezen over grote afstanden kunnen worden beperkt door

hoogspanningsnetten met een spanning van 380000 Volt, of meer, zoals besproken in hoofdstuk 6.1.

De nuchterheid van de Britse Minister voor Transport

"For hydrogen to become cost-competitive to the consumer, one or more of a number of considerations would have to come into play:

- the price of crude oil would have to increase dramatically
- the cost of producing and distributing renewably produced hydrogen would have to come down significantly—
- hydrogen would have to be taxed very lightly or not at all
- hydrogen vehicles would have to become more efficient relative to Internal Combustion engines
- the price of fuel cell vehicles would need to fall dramatically"

Vergelijking van energiedragers

De keus tussen energievervoer over grote afstanden via waterstof in pijpleidingen of via elektrische hoogspanningsleidingen zal afhangen van de bestaande infrastructuur en de kosten voor het transport en voor eventueel nieuwe infrastructuur. De kosten van de infrastructuur op het niveau van wijken in dorp en stad zijn de volgende

- voor het bestaande elektriciteitsnet van 1

kWe zijn de kosten 1500 € per woning, dus 1500 €/kW

- het bestaande aardgasnet is uitgelegd op 1 m³ aardgas per uur, ofwel ca. 9 kW. De kosten van een aardgasnet bedragen ca. 500 € per woning. Kosten per kW zijn in dit geval derhalve ca. 55 €/kW (500 / 9)
- voor waterstof zal het gasnet iets duurder uitvallen

Als men aan het eindpunt, de individuele woning of bedrijf, warmte nodig heeft, zal in de regel een gasnet het goedkoopste zijn. Als men aan het einde elektriciteit nodig heeft, is een keus te maken tussen waterstof via de pijpleiding en eigen productie van elektriciteit in een brandstofcel, of vervoer van elektriciteit via het net. Uit het oogpunt van flexibiliteit bij de gebruiker en leveringszekerheid kiezen de auteurs er voor beide netten (elektriciteit en gas) in stand te houden.

Omzetting van waterstof in elektrische energie

In een brandstofcel loopt proces (3.7.1) van rechts naar links. Men heeft Platina (Pt) nodig als katalysator en een werktemperatuur van $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹⁵³ tot $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹⁵⁴. Met moderne brandstofcellen kan de hoeveelheid Pt worden beperkt tot een prijs van \$ 200 voor een personenauto¹⁵⁵. De prijs van een brandstofcelmotor lag in 1998 op \$ 5000 per kW vermogen, terwijl die voor een verbrandingsmotor lag op \$ 50 per kW. Er was toen dus nog een factor 100 te verbeteren.

Er zijn diverse types brandstofcellen in ontwikkeling, die ook gebruik maken van andere brandstoffen dan waterstof. De fosforzuurbrandstofcel werkt bij $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ met methaan als brandstof en wordt gebruikt voor kleinschalige elektriciteitsopwekking in bijvoorbeeld ziekenhuizen.

De planning van General Motors

"It is likely that fuel-cell generators will be marketed for use in businesses and, eventually, homes, before fuel-cell vehicles are widely available—GM plans to unveil a range of stationary fuel-cell generators that are aimed at a 'high reliability' power segment."

Scientific American, October 2002, 48

Voor waterstof lijkt de Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM) de meeste perspectieven te bieden. Die werkt bij $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ en reactie (3.7.1) naar links verloopt in een membraan van polymeren tussen een poreuze anode en kathode¹⁵⁶. Er kunnen desgewenst veel PEM's achter elkaar worden gezet om een hoge spanning en een groot vermogen te produceren. Momenteel moet er zuivere waterstof worden gebruikt om vervuiling van de brandstofcel te voorkomen. Vandaar dat men bij de proef met bussen in

Amsterdam de waterstof produceert met dure electrolyse.

Een waterstofeconomie is niet probleemloos, en evenmin zonder tegenstanders. Om de moeilijkheden aan te geven, vatten wij de conclusie samen van het Amerikaanse 'Hydrogen Report'¹⁵⁷: "Productie van H met PV zal lang veel te duur blijven, vervoer en distributie van waterstof te duur en de brandstofcel zal eveneens zeer lang veel te duur blijven. Daarom: maak methanol uit steenkool en gebruik dat in een aangepaste verbrandingsmotor. Daar kan de VS met eigen steenkoolvoorraden een paar 100 jaar mee vooruit".

De Nederlandse transportsector

In het jaar 2000 gebruikte de Nederlandse transportsector een energie ter grootte van 457 PJ ($1\text{ PJ} = 10^{15}\text{ J}$) aan benzine (en diesel). Wij maken een schatting van de biomassa die nodig is om via vergassing waterstof te produceren die dezelfde transportbehoefte dekt. Aan H energie hebben we voldoende aan 20/55 ste deel¹⁵⁸, dus 166 PJ.

¹⁵³ UNEP, Energy Technology Fact Sheet, Fuel Cells

¹⁵⁴ Essoscope, lc.

¹⁵⁵ Essoscope, waaraan ook de andere gegevens in deze paragraaf worden ontleend.

¹⁵⁶ Een mooi plaatje in de Scientific American, October 2002, 43

¹⁵⁷ Wilson and Burgh, a.w., pag 38

¹⁵⁸ Zoals eerder gebruiken wij 20% als efficiency voor verbrandingsmotoren en 55% voor brandstofcellen.

De biomassa moet worden geproduceerd door de zon via fotosynthese. Wij berekenen de oppervlakte om 166 PJ biomassa te produceren.

Het probleem is dat er uiteenlopende schattingen bestaan over de opbrengst van biomassa per km². Onder de veronderstelling dat biomassa wordt geproduceerd zonder extra kunstmest en irrigatie, komt een groep uit Wageningen¹⁵⁹ tot een wereldgemiddelde van 74 GJ/ha. Een Novem literatuurstudie¹⁶⁰ geeft 140 tot 200 GJ/ha met uitschieters naar boven. Voor Nederland zullen wij de schatting van 74 GJ/ha nemen¹⁶¹.

De biomassa zal via vergassing een fractie $f=0.57$ worden omgezet in waterstof. De benodigde oppervlakte om de biomassa op onze breedte te telen zou worden

$$(166 \text{ PJ} / 74 \text{ GJ}) / f \text{ ha} = 39 \text{ 000 km}^2 \quad (3.7.7)$$

Het totale Nederlandse areaal aan cultuurgrond is 20 000 km² waarvan 10 000 km² grasland¹⁶².

Wat betreft ruimtebeslag komt autobrandstof, geproduceerd uit biomassa in competitie met biologische landbouw die meer grond zal vragen dan de huidige industriële landbouw; het komt in competitie met voedselproductie en met grootschalige PV.

Uit tabel 3.7.1 volgt dat van de hernieuwbare energiebronnen waterstof uit biomassa vooralsnog de goedkoopste is, met wind een goede tweede. Naast het inzetten van windenergie voor waterstofproductie lijkt de invoer van biomassa, bijvoorbeeld via de Rotterdamse haven, noodzakelijk te zijn. Vanwege de strategische ligging ten opzichte van het hoofdaardgasnet en de Scandinavische en Baltische staten, kan ook de Eemshaven hierin een belangrijk knooppunt worden. Uit hoofdstukken 3.5 en 3.8 volgt, met redelijke veronderstellingen, dat er op wereldschaal voldoende biomassa kan worden gekweekt om aan de vraag op het huidige niveau te voldoen¹⁶³.

De ingevoerde of in Nederland gekweekte biomassa kan worden omgezet in vloeibare of gasvormige brandstoffen (bio-olie, biodiesel, methanol, SNG) die tegen relatief lage kosten kan worden getransporteerd. De biobrandstof kan vervolgens

- a) op centraal niveau worden omgezet in waterstof en gedistribueerd voor stationaire en vervoersdoeleinden;
- b) bij de pomp worden omgezet in waterstof, waarna de waterstof aan boord wordt meegenomen als brandstof voor een waterstof verbrandingsmotor of brandstofcel of
- c) aan boord worden meegenomen en in het vervoersmiddel (via een 'on-board reformer') worden omgezet in waterstof of
- d) rechtstreeks aan een verbrandingsmotor worden toegevoerd zonder de omweg van waterstof

¹⁵⁹ Wolf, a.w., p 846

¹⁶⁰ Beschikbaarheid van biomassa voor energie opwekking (2GAVE00.01-9922), Novem, Utrecht, 2000 pag 6

¹⁶¹ Wolf heeft aan de auteurs als mening gegeven dat het getal voor Nederland niet veel zal afwijken van het wereldgemiddelde

¹⁶² Afgeronde getallen uit Statistisch Jaarboek 2003, CBS, p.278

¹⁶³ Hierbij behoort ook het kweken van biomassa op zee, als dat tegen redelijke kosten haalbaar is.

Als men zoals in optie d) zou kiezen voor biobrandstof in een verbrandingsmotor blijft het voorkomen of uitfilteren van de resulterende emissies een probleem.

Wanneer gebruik zou worden gemaakt van biobrandstoffen in combinatie met on-board reforming en toepassing van de geproduceerde waterstof in een brandstofcel kunnen én grote transportafstanden én een veel hoger conversierendement van de biobrandstof naar arbeid én zeer lage NO_x -, roet-, fijn stof- en zwavelemisssies worden gerealiseerd (“het beste van twee werelden”). Momenteel zijn er echter nog veel problemen met on-board reforming. Dit betreft onder meer de afmetingen van on-board reformers die vanwege de sterk exotherme reacties zeer groot zijn en niet passen in normale personenauto's.

Samenvatting en conclusies

Uitstoot

Waterstof heeft geen uitstoot behalve zuiver water. De productie van waterstof kan, afhankelijk van de productiemethode, wel uitstoot veroorzaken. Biomassa is CO_2 -neutraal. Als de waterstof wordt gegenereerd met biomassa of met hernieuwbare bronnen als zon en wind, is broeikasgasuitstoot afwezig. Bij productie van waterstof uit fossiele brandstoffen komt CO_2 vrij, maar dat kan worden afgevangen en opgeslagen tegen relatief lage kosten (in vergelijking met de kosten bij afscheiding van een reguliere elektriciteitscentrale). Andere vervuilende stoffen, zoals stikstof en zwavel, komen alleen bij biomassa en fossiele brandstoffen vrij.

Implementatie

Het ruimtebeslag van een waterstofeconomie wordt bepaald door de productiemethode: zon, wind of biomassa (zie hoofdstuk 3.8 over implementatie). Elektrolyse-apparatuur en vergassingsinstallaties hebben een matig ruimtebeslag en weinig geluidsoverlast of horizonvervuiling. De maatschappelijke acceptatie van een waterstofeconomie wordt als matig ingeschat maar dat kan veranderen op basis van de proef met autobussen, rijdend op waterstof zoals die onder andere in Amsterdam wordt uitgevoerd.

Het gebruik van waterstof is ook nu al aan tal van veiligheidsvoorschriften gebonden, wat er op wijst dat het gemakkelijk in brand vliegt¹⁶⁴. Volgens de meeste experts is het overigens niet onveiliger dan aardgas. Grote voorraadtanks zijn kwetsbaar voor terroristische aanslagen en voor oorlogshandelingen. Proliferatie speelt geen rol aangezien energieproductie uit waterstof geen rol speelt bij bijvoorbeeld waterstofbommen.

Bij gebruik op grote schaal van waterstofgas zal een onbekend deel weglekken. Dat kan in de onderste lagen van de atmosfeer OH radicalen neutraliseren. Deze ‘stofzuigers’ van de lagere atmosfeer zouden hun werk minder goed kunnen doen, waardoor minder dan nu¹⁶⁵ methaan wordt afgebroken en dus meer methaan in de atmosfeer achterblijft, hetgeen het broeikaseffect kan versterken. Als de waterstof omhoog stijgt naar de stratosfeer, kan het ook daar reageren met OH radicalen, waardoor wolken ontstaan en

¹⁶⁴ Wilson and Burgh, a.w., pag 28

¹⁶⁵ Momenteel onsnapt methaan door lekkage van aardgas uit leidingen en installaties, door rotten van plantaardige materialen en door dierlijke stofwisseling. Die methaan wordt momenteel deels door OH radicalen afgebroken.

het herstel van de ozonlaag vertraagt¹⁶⁶. De ernst van deze milieueffecten is overigens nog onduidelijk.

Voorzieningszekerheid

In 2000 werd 80 % van ons interne energieverbruik in PJ gedekt door de productie van het Nederlandse aardgas. Het hierboven uitgewerkte voorbeeld van transport via Nederlandse biomassa laat zien, dat bij een volledig duurzame energiebalans voor Nederland import van duurzame energie nodig zal zijn. Nederland is te dichtbevolkt om via zon, wind en biomassa op eigen grond in de totale behoefte van een volledige waterstofeconomie te voorzien. Er moet dus waterstof worden geïmporteerd, voor een deel in de vorm van biomassa. Aangezien het Nederlandse aardgas opraakt, zullen wij in de toekomst in alle gevallen afhankelijk zijn van energie-import.

Potentieel

Het is mogelijk dat de energievoorziening volledig op waterstof draait. Daarvoor moet er echter genoeg waterstof worden geproduceerd. Het zal Nederland niet lukken om alle waterstof in eigen land te produceren. De noodzakelijke import van H-energie zal dus door export van andere goederen of diensten moeten worden gecompenseerd. Als het lukt de waterstof duurzaam op te wekken en voor het overige duurzame waterstof te importeren, is het potentieel in termen van vermeden CO₂ uitstoot groot.

Duurzaamheid

Er worden bij gebruik van zon, wind en (duurzaam geproduceerde) biomassa geen voorraden of grondstoffen uitgeput. Het systeem is blijvend duurzaam.

Ontwikkelingslanden

De ontwikkeling van technologie voor waterstofproductie en -omzetting vindt momenteel exclusief in geïndustrialiseerde landen plaats. Implementatie in ontwikkelingslanden zal actieve technologieovername vereisen. Waterstof op basis van biomassa zal in rurale gebieden met kleine vergassers gemakkelijker worden toegepast dan in stedelijke gebieden. In de steden zal de waterstof moeten worden aangevoerd.

Gelijkheid

Biomassa-vergassing is waarschijnlijk de beste optie om waterstof ook in de minder ontwikkelde landen te produceren. Landbouwgrond is op wereldschaal redelijk evenwichtig verdeeld en aan de teelt van biomassa worden niet de hoogste eisen gesteld.

Evaluatie

De waterstofeconomie maakt een samenleving op basis van duurzame energie mogelijk. Het is onwaarschijnlijk dat Nederland op de lange termijn in de eigen energiebehoeften kan voorzien.. Import van energiebronnen zal nog steeds nodig zijn. Waterstof is een energiedrager en alleen het gebruik van waterstof als opslagmedium voor wisselende bronnen als zon en wind draagt bij aan de voorzieningszekerheid.

¹⁶⁶ New Scientist, 15 November 2003, 6-7

¹⁶⁷ Wilson and Burgh, a.w., pag 28

¹⁶⁸ New Scientist, 15 November 2003, 6-7

Het waterstofsysteem is in principe eenvoudig maar lijdt vooralsnog onder de hoge kosten van de brandstofcelmotor. De huidige infrastructuur zal moeten worden aangepast, maar er bestaat voldoende ervaring in Nederland op het gebied van waterstofproductie, vervoer en opslag om hier geen handicap te zien.

Waterstofproductie met duurzame energiebronnen is in de meeste gevallen nog kostbaar. De laagste waarde uit hernieuwbare bronnen wordt bereikt voor de vergassing van biomassa; deze is in tabel 3.7.1 aangegeven met een grote spreiding in kosten; de laagste waarde daarvan is vergelijkbaar met de kosten voor het kraken van aardgas. De beste ingang voor de waterstofeconomie lijkt daarom het kraken van aardgas te zijn, terwijl hard gewerkt moet worden aan kostenvermindering van de vergassing van biomassa tot de laagste waarde.

Bij gebruik voor de transportsector blijft de opslag van voldoende waterstof in een personenauto voorlopig problematisch. Het zou wellicht economischer zijn om biobrandstof uit biomassa rechtstreeks aan een aangepaste verbrandingsmotor toe te voeren zonder de omweg van waterstof.

4 Schoner maken van fossiele brandstoffen

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar twee aspecten. In de eerste plaats het verminderen van de CO₂ uitstoot per kWh van elektrische centrales door andere fossiele brandstof of verhoging van de efficiency (hoofdstuk 4.1) Deze maatregelen zijn in principe onmiddellijk te nemen. In de tweede plaats wordt gekeken naar middelen om vrijkomende CO₂ zo op te slaan dat ze voor zeer lange tijd niet in de atmosfeer terecht komen (hoofdstuk 4.2). Deze maatregelen zijn nog in studie, hoewel ze op beperkte schaal al worden toegepast.

4.1 Schonere brandstof en efficiëntere conversie door Egbert Boeker

In dit hoofdstuk wordt de vraag behandeld in hoeverre fossiele brandstof via technologische verbetering een significante bijdrage kan leveren tot vermindering van uitstoot van CO₂. De gegevens zijn in hoofdzaak ontleend aan een IPCC rapport¹⁶⁹ en een samenvatting daarvan¹⁷⁰. Wij beperken ons tot de sector electriciteitsopwekking, omdat daar de meeste controverses liggen. Ook CO₂ opvang en opslag, zoals beschreven in hoofdstuk 4.2 is alleen relevant voor puntbronnen, zoals electriciteitscentrales. Een verspreide opvang (bijv in ieder woonhuis) en dan vervoer naar een centrale plek is een illusie.

Electriciteitsproductie

Fossiel gestookte elektriciteitscentrales werken op olie, gas of steenkool. Een indruk van de emissies wordt gegeven in tabel 4.1-1:

tabel 4.1-1: emissies van fossiele brandstoffen (globale waarden)	CO ₂ emissie/ (g CO ₂ /kWh _{th}) ¹⁷¹	Beste centrales: CO ₂ emissie/ (g CO ₂ /kWh _e) ¹⁷²	Overige emissies ¹⁷³
olie	260		hoog
aardgas	200	400	laag
steenkool	380	840	hoog

De thermische kolom (emissie per kWh_{th}) is relevant als men de emissie wil berekenen voor huisverwarming. Een 40 kW ketel die 24 uur volop brandt geeft een emissie per dag van 40 maal 24 maal de aangegeven waarde, dus voor aardgas 384 kg CO₂ per dag.

Voorts blijkt uit tabel 4.1-1 dat aardgas de schoonste bron is voor electriciteitsproductie. Naast aardgas wordt tegenwoordig ook gewerkt met vergassing van steenkool of biomassa. Het voordeel is dat tijdens het proces van vergassing of vlak daarna, voordat

¹⁶⁹ IPCC 2001, Third Assessment Report, Vol: Mitigation, te printen vanaf www.ipcc.ch. Het meest essentiële is tabel 3.37, die ook te vinden is in de Summary for Policy Makers, table SPM.1.

¹⁷⁰ Ralph E. H. Sims et al, Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation, Energy Policy 31 (2003), 1315-1326

¹⁷¹ Bron: Shell. Deze getallen sporen met de verwachte emissies op basis van de energie-inhoud van de fossiele brandstoffen.

¹⁷² Het verschil tussen beide kolommen geeft de conversie efficiency van warmte naar electriciteit. Voor gas is dat hier 50% en voor steenkool 44%. Ongeveer de 'beste' waarden die thans worden bereikt.

¹⁷³ Bron: Culp, Principles of Energy Conversion

verbranding plaats vindt, vervuilende stoffen kunnen worden afgevangen. Een tweede voordeel van gas is dat het proces kan plaats vinden in 2 stappen, die elk electriciteit opleveren:

- a) verbranding van gas, waarbij de hete verbrandingsgassen een turbine aandrijven
- b) de nog steeds hete gassen die de turbine verlaten, drijven een warmtemachine aan, bijv een stoomturbine.

Het is natuurlijk ook mogelijk de restwarmte van een centrale of van een chemisch proces te gebruiken voor nuttige warmte in gebouwen of huizen. Dat is besproken in hoofdstuk 2.2 over warmte-krachtkoppeling (WKK).

Moderne technologie

De beste gangbare technologie zijn de volgende twee turbines en systemen:

CCGT= Combined Cycle Gas Turbine. Deze turbine werkt op aardgas volgens de hierboven genoemde twee stappen en bereikt thans al een efficiency van 60%, die –naar verwachting- kan oplopen tot 70% in de toekomst. De huidige efficiency van de Nederlandse Eemscentrale, een van de beste van West-Europa, is 55 %¹⁷⁴.

IGCC = Integrated Gasification Combined Cycle. Deze cyclus werkt met vergassing van steenkool of olie en kan – naar verwachting – een efficiency behalen van 50% tot 60%¹⁷⁵. Volgens het rapport van Sims (a.w.) waren deze steenkoolvergassingsinstallaties in een 'early commercial stage'. We kunnen aannemen, dat het commerciële stadium thans nabij is.

Hoe hoger de temperaturen, hoe hoger de efficiency. Moderne materialen in stoomturbines verminderen corrosie en maken hogere temperaturen mogelijk dan voorheen; men gebruikt nu zogenoemde superkritische stoom. Maar de installaties worden door deze materialen wel duurder.

Bij lage temperaturen werkt stoom niet meer goed in het aandrijven van turbines. Vandaar dat er onderzoek wordt gedaan naar andere stoffen dan water om de restwarmte van centrales en industriëen op te nemen. Dit soort projecten bevindt zich in het research stadium en de toekomst is onzeker.¹⁷⁶

Olie is bij elektriciteitsproductie van minder betekenis (thans 10% van het totaal, of 15% van de fossiele brandstoffen). Het ligt voor de hand dat bij schaarser wordende olie (verwacht tussen 2004 en 2015) de olie vooral ingezet zal worden voor de productie van benzine en kerosine. De keuze voor electriciteitsproductie (aldus het rapport van Sims) zal gaan tussen gas en steenkool. Zonder overheidsstimulansen zal die keus afhangen van de beschikbare infrastructuur (is er gas of steenkool in de buurt; bestaan er pijpleidingen) en van de kosten. Daarbij wordt er onderscheid gemaakt tussen de kosten van het kapitaal¹⁷⁷, van de brandstof, en van onderhoud/bediening. In

¹⁷⁴ Bron: Rokus Wijnbrans

¹⁷⁵ Sims, p 1317. 'Naar verwachting' betekent dat het nog niet gerealiseerd, maar wel zeer waarschijnlijk is.

¹⁷⁶ New Scientist, 29 May 2004, 21

¹⁷⁷ De kapitaalkosten zijn sterk gevoelig voor de eis die de kapitaalverschaffer stelt aan zijn rendement (de discount rate), het aantal jaren waarover wordt afgeschreven, en het aantal uren per jaar dat de installatie in bedrijf is. Een investering van 1000 €/kW, 8 % discount, 30 jaar afschrijving en 100 % in bedrijf (basislast) geeft kapitaalkosten van 1 ct/kWhe of bij 20 jaar afschrijving 1.2 ct/kWhe..

ontwikkelingslanden is kapitaal duur en wordt in de regel gekozen voor een wat goedkopere installatie met lagere efficiency en daarom per kWh een hogere uitstoot.

Sims (a.w.) geeft tabellen voor (bijna) alle opties om electriciteit op te wekken, de kosten, de vermeden C uitstoot en het totale potentieel van C emissie reductie in 2010 en 2020. Uitgangspunt bij het laatste is dat de dreiging van een C-belasting plus rendementsoverwegingen de industrie aanzetten tot zuinige (ver) nieuwbouw.

Sims (a.w.) gaat uit van twee referentiepunten: waar nu steenkool als voornaamste bron voor electriciteitsopwekking wordt gebruikt, neemt hij (a.w.) als referentiepunt gebruik van poederkool, ontwaveling, en NOx afvang en vergelijkt andere opties daarmee.. Waar gas als voornaamste fossiele brandstof voor centrales wordt ingezet, gaat hij uit van het CCGT proces als referentiepunt.

De kosten van afvang van CO₂ uit een gasstroom, transport over 300 km (om de gedachten te bepalen) en ondergrondse opslag worden geschat op 41 \$ tot 60 \$ per ton opgeslagen CO₂. Voor de berekeningen wordt een getal van 45 \$ per ton opgeslagen CO₂ gebruikt.

Gas is van de fossiele bronnen, onder goede condities, goedkoop¹⁷⁸ en schoon: 3.45 \$ct/kWh met een emissie van 396g CO₂/ kWh¹⁷⁹. Met CO₂ afvang, transport en opslag gaan de emissies omlaag naar 62 g CO₂/ kWh wat de prijs omhoog brengt tot 4.95 \$ct/kWh.

Bij steenkool is de emissie 840 g CO₂/kWh maar dit kan met vergassings-technieken wegens efficiency verhoging omlaag naar 715 g CO₂/kWh voor uiteenlopende prijzen. Vergassing + CO₂ opslag brengen de emissies verder omlaag tot 147 g CO₂/kWh terwijl de prijs oploopt tot 7.9 \$ct/kWh. De prijsverhoging bij gas is dus rond 1.5 \$ct/kWh en bij vergaste steenkool 3 \$ct per kWh. Het verschil is dezelfde factor 2 die men ook in tabel 4.1-1 tegen komt..

Ruwweg beperkt CO₂ opslag de emissies met een factor 5 (als het inderdaad lukt om het voor 'eeuwig' op te slaan).

Omdat steenkool (een verzamelnaam voor anthraciet, bitumen en bruinkool) momenteel de grootste fossiele electriciteitsbron is (60% van de fossiele bronnen), zou grootscheepse overgang naar gas + opslag de beste emissieresultaten boeken. De voorraden goedkope steenkool zijn echter verreweg het grootste, dus er zal, ook op termijn, een mengvorm steenkool + gas blijven.

Zonder CO₂ opslag kan er bij electriciteitsopwekking door steenkool door het IGCC proces op termijn 10 tot 15 % in CO₂ emissies worden bezuinigd; bij gas is er zonder opslag niet veel extra te besparen. Alleen de geleidelijke vervanging van oude turbines door modernere met hoog rendement helpt, maar na 20 of 30 jaar zullen alle centrales wel op het hoogste rendement werken. De overgang van steenkool → gas bespaart 50 % op de CO₂ emissies. De mogelijkheden van het laatste zijn, zoals gezegd, beperkt.

¹⁷⁸ Volgens Sims (a.w.) is gas goedkoper dan steenkool. In Nederland bestaan thans plannen om een steenkoolcentrale te bouwen, omdat die goedkoper is dan een gascentrale. Daaruit blijkt dat dit soort prijsbeschuwingen gebonden is aan tijd en misschien plaats.

¹⁷⁹ Zonder index betekent kWh in dit hoofdstuk de elektrische kWh.

Het Internationale Energie Agentschap, de IEA (Sims, a.w., tabel 1) voorziet een verdubbeling in fossiele electriciteitsopwekking van 2000 → 2020. Zonder CO₂ opslag zal dit leiden tot stijging van CO₂-emissies. Maar CO₂ opslag zal tot 2020 slechts beperkt soelaas kunnen bieden. De 'meest optimistische schatting' van Sims volgt hieronder in tabel 4.1-2; deze geldt voor afwezigheid van overheidsdwang, maar gaat uit van een zekere, vrijwillige mate van CO₂ opslag. Een belasting op CO₂ emissies zal die emissies sterker reduceren, maar die belasting zal dan wel moeten corresponderen met een prijs van 150 \$ per ton uitgestoten CO₂. Voor die prijs worden veel duurzame energiebronnen ook al sterk concurrerend.

tabel 4.1-2.	jaar 2000	jaar 2010	jaar 2020
CO ₂ volgens IEA/(Mton per jaar)	8 800	11 550	14 650
Mogelijke besparing hierop vlg Sims		- 550	- 2550

Zonder CO₂ opslag is er – voor de langere termijn een volgende schatting te maken: thans is de wereldwijde efficiency van electriciteitsstations ruim 30 %. Dat kan bij (ver) nieuwbouw en met het nodige kapitaal¹⁸⁰ oplopen tot 60%, hetgeen de emissie per kWh halveert. Als we inderdaad naar stabilisatie van CO₂ concentraties in de atmosfeer toe willen, zal de CO₂ emissie aanzienlijk moeten dalen. Als het aantal kWh fossiel constant zou blijven en de efficiency verdubbelen dan komen wij een heel eind in de goede richting. Extra electriciteit zal dan van andere bronnen moeten komen.

Samenvatting en conclusies

Dit leidt tot onderstaande conclusies voor fossiele electriciteit met hoge efficiency en steenkoolvergassing maar *zonder C opslag*. Wij gaan, evenals Sims (a.w.) uit van vrijwillige technologische inspanning van de industrie en vergelijken met 'Business as Usual' (afgekort als BAU), dat wil zeggen de IEA uitstoot scenario's van tabel 4.1-2. Bij een belasting op CO₂ uitstoot of een premie op vermeden uitstoot kan een grotere uitstootvermindering worden bereikt.

Uitstoot

Er is uitstootvermindering maar die is niet erg groot (tabel 4.1-2). De uitstoot van S, N en vlieggas is vergelijkbaar met BAU.

Implementatie

Geen verschil met BAU. Het ruimtebeslag van fossiele centrales blijft beperkt tot de mijnbouw (waar dikwijls de milieuschade wordt hersteld) en de sintelbergen. Aangezien de centrales in de regel buiten de bewoonde wereld staan is geluidsoverlast beperkt en wordt horizonvervuiling niet als probleem gezien. Bovendien is 'men' aan fossiele centrales gewend. De maatschappelijke acceptatie van technologische verbetering, eventueel zelfs tegen een iets hogere energieprijzen lijkt hoog.

Voorzieningszekerheid

Geen grote verschillen met BAU. De toevoerafhankelijkheid van het buitenland wordt minder bij efficiëntere centrales, maar steenkool moet in de regel over grote afstanden worden vervoerd en gas-pijpleidingen zijn vatbaar voor aanslagen en oorlog. Technologisch meer geavanceerde ontwerpen vereisen meer technisch geschoold

¹⁸⁰ Ontwikkelingslanden zullen het kapitaal uit de rijkere landen moeten betrekken

personeel voor onderhoud, reparatie en bediening, dit is een minpunt. De bestaande infrastructuur kan gewoon worden gebruikt.

Potentieel

Bij de vervanging van minder efficiënte door meer efficiënte centrales wordt er minder CO₂ uitgestoten. Maar als de efficiency winst eenmaal is geïncasseerd, blijft er weinig speelruimte over.

Duurzaamheid

Op een termijn van 200 jaar zal er na het olieprobleem ook sprake zijn van een gebrek aan gas. Op een termijn van 500 jaar kan ook een gebrek aan steenkool worden verwacht.

Ontwikkelingslanden

In stedelijke gebieden is voldoende technologische kennis om geavanceerde fossiele centrales te bedienen. Er is ook voldoende netcapaciteit aanwezig. Voor landelijke gebieden zijn kapitaalsintensieve fossiele centrales te duur.

Gelijkheid

Mogelijkheden voor ontwikkelingslanden hangen af van de beschikbaarheid van voldoende kapitaal tegen matige rente. Technisch zijn er mogelijkheden om de fossiele electriciteitsopwekking over de aardbol te herverdelen.

Evaluatie

Efficiencyverbetering van fossiele electriciteitsopwekking is een noodzaak. De verwachte groei van het fossiele gebruik volgens tabel 4.1-2 betekent dat efficiencyverbetering niet veel meer is dan een druppel op de gloeiende plaat. We zullen echt toe moeten naar een minder energie-intensieve samenleving. Hetgeen niet wegneemt dat de aangegeven technologische verbeteringen moeten worden nagestreefd. Een afname van CO₂ uitstoot op wereldschaal is te bereiken door bij vervanging van oude centrales door nieuwe alleen de hoogstrenderende te bouwen en door vergroting van de electriciteitsproductie duurzaam te organiseren. Dit impliceert een verplaatsing van fossiel vermogen van de ontwikkelde landen naar ontwikkelingslanden.

4.2 CO₂ - afvang en - opslag door Heleen de Coninck

Het afvangen en opslaan van CO₂ als grootschalige optie om broeikasgasuitstoot te reduceren is sinds een jaar of twee weer in zwang. Het principe berust erop dat de elektriciteitsproductie uit kolen en gas dusdanig wordt aangepakt, dat een zo zuiver mogelijke CO₂ stroom uit de centrale komt. Het CO₂ wordt volgens een keur aan technieken die variëren van membraantechnologie tot uitvriezing gescheiden van de andere uitstoot, getransporteerd (meestal met een pijpleiding) en opgeslagen op een daarvoor geschikte plek. Het afscheidingsproces kan ook zo worden vormgegeven, dat er naast CO₂ waterstof geproduceerd wordt. Dit is zelfs relatief aantrekkelijk omdat het een zuivere CO₂ stroom oplevert en zo de kosten voor afscheiding van CO₂ van de andere gassen sterk reduceert.

Afvang

Er zijn drie systemen om CO₂ af te vangen: na de verbranding (post-combustion), vóór de verbranding (pre-combustion) en door zuurstofrijke verbranding (oxy-fuel combustion).

Afvang na de verbranding (post-combustion)

Bij 'post-combustion' worden het gas of de kolen op conventionele wijze verbrand en wordt het CO₂ uit de uitlaatgassen afgescheiden door bijvoorbeeld met behulp van ammonia (amine scrubbing). Dit heeft als nadeel dat het veel geld en energie kost om de lage concentraties CO₂ (4 % uit gas tot 14 % uit kolen) af te scheiden.

Afvang voor de verbranding (pre-combustion)

Bij 'pre-combustion' reageert de fossiele brandstof met zuurstof en lucht, waarbij een CO en waterstof mengsel ontstaat¹⁸¹. Bij conversie in een zogenaamde water shift reactor (met stoom) wordt er CO₂ en opnieuw waterstof geproduceerd. Het CO₂ wordt afgescheiden en het waterstof gebruikt voor stroomopwekking of als brandstof. Dit proces komt voor kolen, olie of gas op hetzelfde neer, al zijn er bij kolen en olie meer gaszuiveringsstappen nodig. Het proces produceert CO₂ met een hogere zuiverheid (25 % bij gas tot 40 % bij kolen) dan bij 'post-combustion'. Daar staat tegenover dat er ingrijpende veranderingen in een centrale moeten worden doorgevoerd voor hij geschikt is voor 're-combustion'.

Zuurstofrijke verbranding (oxyfuel combustion)

Bij 'oxyfuel combustion' worden de kolen of het gas met zuivere zuurstof verbrand. Dit levert een nog hogere CO₂ concentratie (80%) op, maar daar staat tegenover dat er zuivere zuurstof nodig is voor de verbranding. De zuurstof kan door cryogene luchtafscheiding verkregen worden, een proces dat grootschalig wordt toegepast in de staalindustrie. Er kunnen echter, naast in de CO₂ afscheidingstappen, ook in het zuurstofproductieproces nog grote winsten worden geboekt, zowel in termen van energieverbruik als in termen van kosten.

¹⁸¹ Zie ook hoofdstuk 3.8 over waterstofproductie

Het afvangen CO₂ gaat vrijwel altijd met extra kosten gepaard. Als vuistregel geldt echter: hoe hoger de concentratie van CO₂ in de reststroom, des te lager de kosten en hoe aantrekkelijker de optie wordt.

Een goedkope en gemakkelijk te realiseren mogelijkheid in Nederland is het gebruik van CO₂ uit de industriële ammoniak- of waterstofproductie (ca. 3,5 ton CO₂/jaar, tegen kosten rond de 5 €/tonCO₂, ca. 99% zuiverheid). Daarnaast kan er gekeken worden naar CO₂-afscheiding die "toch al moet". Bij gaswinning is het methaan vaak onverkoopbaar omdat het vermengd is met CO₂. Dat moet worden afgescheiden en wordt normaal naar de atmosfeer geëmitteerd. Als er een mogelijkheid tot CO₂ opslag is, kan het echter direct worden gecompriëerd en worden opgeslagen in het dichtstbijzijnde geschikte reservoir. In het Sleipner CO₂ opslag project in Noorwegen is de bron van CO₂ op deze manier gegenereerd, en er staan wereldwijd meer van dergelijke projecten in de planning. Ook het enige geplande demonstratieproject in Nederland van Gas de France (20 kiloton CO₂ per jaar, op zee)¹⁸² is op dit principe gebaseerd.

Omdat CO₂ afscheiding soms al moet gebeuren is het een bekende techniek. Er kan echter, vooral met onzuivere stromen, nog veel aan efficiëntieverbetering worden doorgevoerd. In Nederland wordt veel onderzoek gedaan aan systeemintegratie, gecombineerde waterstofproductie ('pre-combustion') en afscheiding door bijvoorbeeld membraantechnieken. Naar verwachting zullen de kosten voor afvang van CO₂ in de nabije toekomst snel dalen, vooral indien nieuwe elektriciteitscentrales op efficiënte CO₂ afvang worden ontworpen en ingericht. De voornaamste risicofactor die met CO₂ afvang wordt geassocieerd is dat de (energie)kosten uit elektriciteitscentrales wellicht niet voldoende kunnen worden verminderd waardoor de optie van CO₂ opslag beperkt blijft tot de zuivere bronnen.

CO₂ afvang (en compressie voor transport of opslag) is de meest dure en energie-intensieve stap in het afvang en opslag proces van CO₂. Het onderzoek richt zich nu sterk op het minimaliseren van de "energy penalty". Hoe meer energie er immers wordt gebruikt bij het afvangen van CO₂, des te minder "winst" wordt er geboekt bij de reductie van CO₂, omdat die energie eerst moet worden opgewekt. De rendementsdaling van een elektriciteitscentrale bij afscheiding en compressie van CO₂ komt neer op 16 tot 35 %¹⁸³.

Transport

Het afgevangen, relatief zuivere CO₂ wordt gecompriëerd en door een leiding naar de opslagplek vervoerd. De kosten van deze stap lopen op met het aantal kilometers en hangen bovendien af van de dikte van de pijpleiding. Hoe meer CO₂ men in een keer opslaat, des te goedkoper het transport wordt. Met name in de Verenigde Staten wordt CO₂ gebruikt om de opbrengst van olievelden te verhogen. Er is daar dus veel ervaring met CO₂-pijpleidingen en veiligheidsproblemen bij transport zijn daar nog niet opgetreden. Het lekken van kleine hoeveelheden CO₂ moet echter wel goed in kaart worden gebracht als er een vergoeding gegeven gaat worden voor het vermijden van uitstoot van CO₂. Tot nu toe werd CO₂ in de VS alleen maar in de grond gestopt om olie

¹⁸² Ministerie van Economische Zaken: Beleidsnotitie Schoon Fossiel, September 2003.

¹⁸³ Jansen, D., ECN, presentatie over DECAFE project, gehouden bij ECN, Petten, 28 april 2003.

eruit te krijgen, niet om het er te houden. Dat is een fundamenteel verschillende benadering en vergt ook andere regulering.

Geologische opslag

De opslag van CO₂ in geologische formaties kan op grofweg vier manieren:

Enhanced Oil Recovery (EOR):

Als olievelden leeg zijn, is vaak nog zo'n 40 – 60% van de olie niet gewonnen omdat men het er niet uit krijgt. Door het injecteren van CO₂ in zo'n niet-productief veld wordt de olie gemobiliseerd en kan de opbrengst verhoogd worden. Het CO₂ blijft in principe achter. In de VS wordt dit al veel (op bijna 80 plaatsen) toegepast omdat de olievelden zich er daar goed voor lenen. In Europa is de geschiktheid veel lager. Het CO₂ dat de oliebedrijven in de VS gebruiken is voornamelijk afkomstig uit natuurlijke bronnen, niet uit bijvoorbeeld een chemische fabriek. EOR is netto winstgevend op de manier waarop het nu gebeurt. Echter, als het CO₂ gecontroleerd onder de grond moet blijven en men de CO₂ van centrales moet halen in plaats van te winnen uit een natuurlijke bron, kan het duurder worden. Potentieel: ca. 920 Gigaton CO₂ met gasvelden samen¹⁸⁴. Kosten: veelal negatief, maar met het monitoren van het veld waarschijnlijk ongeveer quitte (zie figuur 4.2.1).

Saline aquifers:

De opslag van CO₂ in een diepgelegen zoutmeer onder land of zee wordt ook al gedaan. De geschiktheid hangt sterk af van de kap op zo'n aquifer. Metingen hebben aangetoond dat het water in sommige aquifers al duizenden jaren vastzit zonder contact met andere stoffen, en er is dus reden om aan te nemen dat de kap op deze ondergrondse watermassa's behoorlijk ondoordringbaar is. Als men onder druk CO₂ injecteert is de verwachting dat het er ook lang blijft zitten. Het potentieel van saline aquifers is erg onzeker, maar in ieder geval groot (400 – 10 000 Gigaton CO₂)¹⁸⁵.

Lege gasvelden of –opslagplaatsen:

CO₂ adsorbeert beter aan de bodem dan methaan, en kan dus in oude gasvelden worden geïnjecteerd. Deze velden hebben immers al aangetoond jarenlang methaan te kunnen bevatten, dus waarom geen CO₂? Er zijn wel chemische verschillen tussen methaan en CO₂, maar het is de verwachting dat CO₂ goed opgeslagen kan worden in gasvelden. Er zijn zelfs speculaties dat het nadelige effecten als bodemdaling tegen kan gaan, maar dat is niet zeker. Potentieel: ca. 920 Gigaton CO₂¹⁸⁶ met EOR samen. Het potentieel in gasvelden in Nederland is ca. 1200 Megaton CO₂ voor het jaar 2040. Daarna is het gasveld bij Groningen uitgeput en kan dat potentieel van 6500 Megaton CO₂ worden aangesproken¹⁸⁷.

¹⁸⁴ Gale, J., Overview of CO₂ emission sources, potential, transport and geographical distribution of storage possibilities, in: Proceedings of IPCC Workshop on carbon dioxide capture and storage (pp. 15-30), 2002.

¹⁸⁵ Gale, a.w.

¹⁸⁶ Gale, a.w.

¹⁸⁷ Dijk, J.W., van, and P. Stollwerk, CRUST: CO₂ re-use through underground storage – The start-up: an inventory of market opportunities, technology and policy requirements, August 2002.

Enhanced Coal Bed Methane recovery:

CO₂ verdringt methaan dat in de poriën van onmijnbare koollagen zit. Op de plek van 1 methaanmolecuul kunnen zelfs twee CO₂ moleculen geadsorbeerd zitten. Injecteert men koolstofdioxide dus in zo'n kolenlaag en zuigt men de mijngassen af, dan kun men methaan winnen dat gebruikt kan worden voor de energievoorziening, wat deze optie weer relatief aantrekkelijk maakt. De verbranding van het gewonnen methaan kan dan dus klimaatneutraal worden genoemd (even vergetend dat de afvang van CO₂ al het nodige aan energie heeft gekost). Potentieel: 20 Gigaton CO₂¹⁸⁸, in Nederland wordt het huidig praktisch potentieel op 54 Megaton CO₂ gesteld, maar het echte potentieel is waarschijnlijk groter, zo'n 600 Megaton. De theoretische schattingen lopen richting 8000 Megaton CO₂. Methaan uit ECBM kan onder bepaalde aannames 5% van de energiebehoefte van Nederland voor de komende 25 jaar dekken¹⁸⁹

Oceaan opslag

Naast geologische opslag zijn er verschillende andere mogelijkheden voor CO₂ opslag, te weten oceaan opslag (injectie in de oceaan waarna het oplost, of injectie onder hoge druk op de zeebodem, waarbij een "CO₂-zee" wordt gecreëerd), mineralisatie, opslag in gebruiksmaterialen, hergebruik van CO₂, en biologische sequestratie al dan niet geïnduceerd door ijzerfertilisatie. Deze opties nemen wij thans niet in beschouwing, omdat ze ecologisch zeer riskant zijn.

Risico's

Hoe weten we zeker dat het CO₂ blijft waar het is? Er zijn overtuigende argumenten van zowel fysisch-chemische als geologische aard, dat het opgeslagen CO₂ ook permanent opgeslagen blijft. Natuurlijk hangt dit af van de lokatiekeuze van de geologische reservoirs, en er wordt dan ook aangenomen dat de keuze niet op onveilige, lekkende formaties zal vallen. Normen hiervoor moeten nog worden opgesteld. Navraag bij geologen die hiermee bezig zijn levert een groot vertrouwen in de permanentie van de opslag op, mits de lokatie verstandig gekozen is.

Gasvelden en onmijnbare kolenlagen houden zelf al miljoenen jaren methaan vast en hebben zich dus bewezen als duurzaam gasreservoir. CO₂ adsorbeert zelfs beter aan de bodem dan aardgas en kan bovendien in sommige gevallen mineraliseren, wat tot een onomkeerbare opslag leidt. Metingen in het water van saline aquifers tonen aan dat dat water al miljoenen jaren geen uitwisseling met andere stoffen heeft gehad, oftewel, het reservoir is zeer dicht.

Bij de opslag kan worden berekend wat de veilige druk is van het reservoir. Die druk wordt bij de opslag voortdurend door instrumenten gecontroleerd. Met geologische meetmethoden (seismische signalen de bodem insturen en het teruggestrooide signaal analyseren) kan tot een nauwkeurigheid van 10 kiloton CO₂ worden bepaald hoeveel CO₂ zit en hoe het migreert. De Noorse Utsira formatie, waarin Statoil het Sleipner-CO₂ opslaat, wordt op deze manieren in de gaten gehouden. Nergens blijkt uit dat het CO₂

¹⁸⁸ Gale, a.w.

¹⁸⁹ Novem, Potential for CO₂ sequestration and Enhanced Coalbed Methane production in the Netherlands, March 2001.

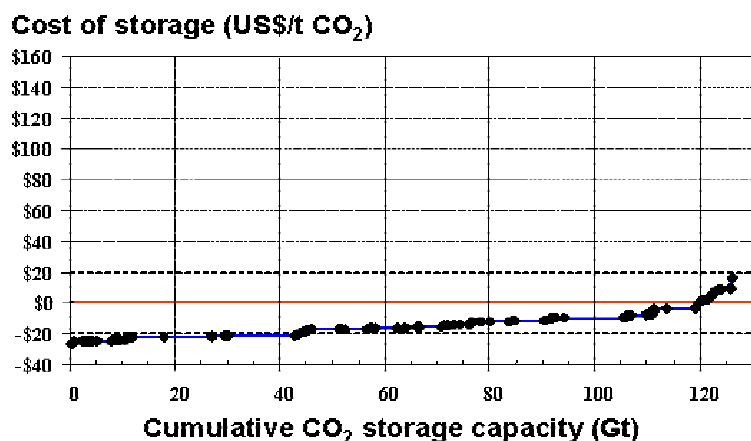
minder wordt en de migratie is zelfs minder dan verwacht. Er zijn echter wel onzekerheden in het meetproces die afdoende moeten worden meegenomen.

Publieke acceptatie

Niet zelden wordt een parallel getrokken tussen kernsplijting en CO₂ opslag in termen van publieke opinie. CO₂ opslag heeft voordelen, maar ook nadelen. De risico's zijn nog niet gekwantificeerd (en bovendien per reservoir sterk verschillend) maar de ervaring leert dat het publiek zich weinig aantrekt van risicokwantificaties. Als het publiek CO₂ opslag als "eng" ervaart, is het per definitie foute boel. De beleidsmakers en wetenschappers zijn als de dood voor de publieke opinie en zijn nog erg voorzichtig met het naar buiten brengen van gegevens. Een recent (nog niet gepubliceerd) onderzoek van een stagiaire bij ECN levert een gematigd beeld op: in Alkmaar zijn mensen niet echt blij met eventuele opslag diep onder hun huis, maar ze raken er niet van in paniek. Er is verder nog zeer weinig onderzoek gedaan naar de perceptie van CO₂ opslag door het publiek. De mening van de milieu-organisaties, die een paar jaar geleden over het algemeen faliekant tegen CO₂-opslag waren, maar inmiddels beginnen bij te draaien, speelt overigens ook een rol in de publieke perceptie.

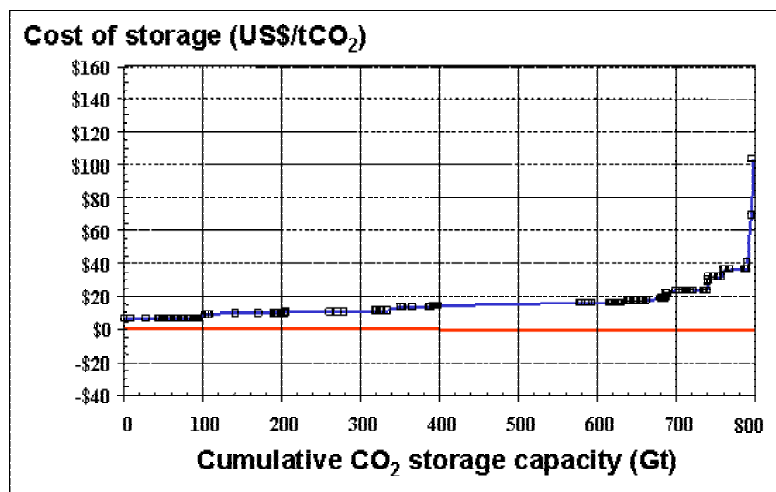
Kosten en potentieel

De geschatte kosten van CO₂ opslag in relatie met het potentieel worden samengevat in onderstaande kostencurves¹⁹⁰. In de curves staat horizontaal steeds de totale ingezette opslagcapaciteit uit en verticaal de kosten per ton opgeslagen CO₂. In figuren 4.2.1 vindt men de EOR, in figuur 4.2.2 de opslag in lege gasvelden en in figuur 4.2.3 de kosten voor de onmijnbare kolenlagen.

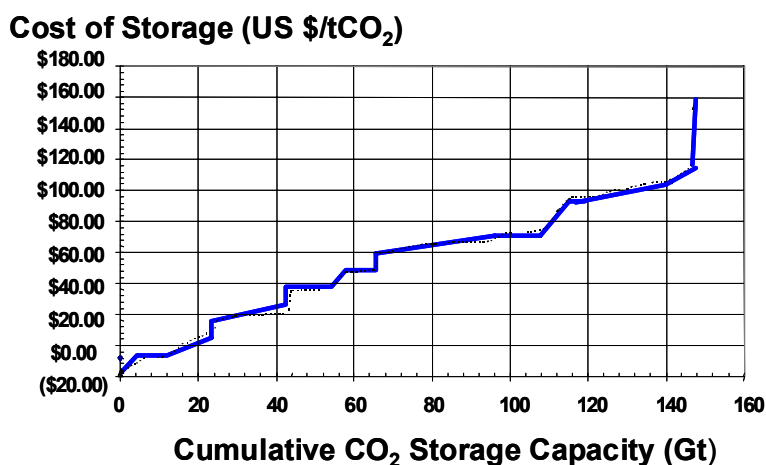


Figuur 4.2.1: Potentieel en kosten van Enhanced Oil Recovery.

¹⁹⁰ Freund, P., and J. Davison, General overview of costs, in: Proceedings of IPCC Workshop on carbon dioxide capture and storage (pp. 79-94), 2002.



Figuur 4.2.2: Potentieel en kosten van CO₂ opslag in gasvelden



Figuur 4.2.3: Potentieel en kosten van CO₂ opslag in koollagen

Samenvatting en Conclusies

Uitstoot

CO₂ afvang en opslag heeft een zeer groot potentieel om broeikasgassen in de atmosfeer te verminderen. Er zijn ook synergieën denkbaar met het verminderen van andere vervuiling, met name met het verminderen van de verzurende stoffen als gevolg van elektriciteitsproductie uit kolen en gas.

Implementatie

Ondergrondse opslag van CO₂ neemt bovengronds, afgezien van enkele installaties, geen ruimte in beslag. Ook zal het weinig invloed hebben op geluidsoverlast of horizonvervuiling. Vanwege het effectgerichte karakter van de optie is het waarschijnlijk dat de maatschappelijke acceptatie in eerste instantie niet hoog zal zijn. Het publiek heeft vaak een beter gevoel bij het voorkomen van problemen dan bij het "oplossen" ervan door effectgerichte maatregelen.

Zekerheid

CO₂ opslag laat toe dat kolen langer kunnen worden gebruikt voor de energievoorziening en draagt dus bij aan de voorzieningszekerheid. Aangezien het voortborduurt op de

huidige energiebronnen, is het infrastructureel goed inpasbaar. Terrorismerisico, proliferatie en weersafhankelijkheid zijn niet problematisch. Het scoort niet goed in termen van technologische eenvoud.

Potentieel

Het potentieel in termen van CO₂ uitstootvermindering is goed maar niet oneindig.

Duurzaamheid

Vanwege het eindige potentieel, de uitputbaarheid en de geassocieerde voortzetting van het delven van fossiele brandstoffen is CO₂ geen duurzame oplossing te noemen voor een periode van 200 jaar.

Ontwikkelings-landen

Er ligt veel potentieel voor toepassing in ontwikkelings-landen maar de benodigde capaciteit is daar nog niet aanwezig.

Gelijkheid

Vanwege het wereldwijde potentieel biedt CO₂ opslag mogelijkheden om tot een gelijkwaardige voetafdruk in termen van broeikasgasuitstoot te komen

Evaluatie

CO₂ opslag scoort goed op de gebieden uitstootvermindering, implementatie (= overige milieueffecten), en zekerheid. Het is nu nog een toepassing bedacht door geïndustrialiseerde landen die voorlopig alleen door multinationale ondernemingen in ontwikkelingslanden zal worden geïmplementeerd. Het potentieel is substantieel en deze optie maakt waarschijnlijk deel uit van het portfolio om in deze eeuw een eind op streek te raken met een drastische vermindering van broeikasgasemissie.

5 Kernenergie

Bij kernenergie kan men onderscheid maken tussen kernsplijting en kernfusie.

Kernsplijting is een bewezen technologie. Het proces berust op het fysische principe dat een zware atoomkern, zoals Uranium, onder gecontroleerde omstandigheden kan worden gesplitst in twee of drie lichtere kernen. Die kernen zijn samen minder zwaar dan de oorspronkelijke. Daarom wordt massa omgezet in een grote hoeveelheid energie.

Op 22 April 2004 heeft de groep een uitvoerige tweede discussie gewijd aan kernsplijting, met name de aspecten van reactorveiligheid, proliferatie en langlevend radio-actief afval. De meningen waren verdeeld, met name over dit laatste punt en zijn met de betreffende argumenten toegevoegd aan het einde van hoofdstuk 5.1.

Kernfusie is als technologie het researchstadium voorbij en bevindt zich thans in het ontwikkelingsstadium. Het proces berust op het fysische principe dat twee zeer lichte atoomkernen, waterstof of zwaar waterstof worden gecombineerd tot één zwaardere. Die zwaardere kern is toch wat lichter dan de oorspronkelijke kernen samen. Ook hier wordt daarom massa omgezet in een enorme hoeveelheid energie. Indien een kernfusie-reactor goed en betrouwbaar blijkt te werken, zal kernenergie maatschappelijk veel acceptabeler kunnen worden, omdat veel van de bezwaren die bij kernsplijting horen voor fusie niet gelden. Bovendien kent fusie geen brandstof probleem. De twee types zwaar water die nodig zijn voor de reactie kunnen gemakkelijk uit water en lithium worden gewonnen. Er is genoeg brandstof voor duizenden jaren energievoorziening.

5.1 Kernsplijting door Egbert Boeker

Men kan onderscheiden tussen de traditionele lichtwaterreactoren, het thans dominante type of verbeterde versies daarvan, en geheel nieuwe ontwerpen zoals de HTR, de Hoge Temperatuur Reactor. Beide versies berusten op splijting van zware kernen, waarvan hieronder eerst de principes worden uitgelegd.

Het principe

Verreweg de meeste kerncentrales, die thans in gebruik zijn, zijn de zogeheten 'lichtwater' reactoren. Zij maken gebruik van licht verrijkt Uranium 235 als splijtstof. 'Licht verrijkt' betekent dat de natuurlijke verhouding 0.7 % U235 ¹⁹¹ tegenover 99.3 % U238 langs technische weg wordt veranderd in, zeg, 3.5 % tegenover 96.5 %. In Nederland werken drie zulke reactoren: één in Borssele, die commerciële electriciteit levert (350 MWe) en daarnaast kleine onderzoekreactoren in Delft en Petten. De laatste levert ook radio-actieve preparaten voor medisch gebruik op commerciële basis.

Het principe van de reactor is dat neutronen U235 splijten, hetgeen opnieuw neutronen oplevert en warmte. Die warmte wordt dan via turbines omgezet in elektrische stroom. Splijting van U235 geeft lichtere splijtingsproducten, die sterk radioactief zijn en vooral de eerste dagen na hun ontstaan ook zelf nog veel warmte afgeven. Neutronenvangst in U238 (de meerderheid van het U, namelijk in de orde 96.5%) levert zwaardere kernen, de *actiniden*, waaronder de Pu isotopen.

¹⁹¹ Officieel wordt dit aangegeven als ²³⁵U. Wij schrijven, zoals men het uitspreekt, U235.

Wij gaan hieronder diverse aspecten van de gangbare reactoren langs, en daarna die van de HTR, een alternatief ontwerp.

De kerncentrale / reactorveiligheid

Het meest karakteristieke van een kerncentrale is zijn hoge energiedichtheid van tientallen MW/m³. Dit levert zijn hoge energieproductie bij relatief weinig brandstof, maar heeft ook als gevolg heeft dat na een noodstop van de centrale de warmte van de splijtingsproducten moet worden afgevoerd. Gebeurt dit onvoldoende dan kan de reactor smelten, of er kan een chemische explosie plaats vinden. Hoewel allerhande veiligheidsmaatregelen zijn getroffen, en er niet veel grote ongelukken met reactoren zijn gebeurd (in feite alleen Harrisburg en Tsjernobyl) vereist het systeem zorgvuldig opereren. Er zijn diverse bijna-ongelukken voorkomen door tijdig ingrijpen. Er is voor de implementatie van kernsplijting dus een kader nodig van technisch goed geschoold personeel.

Voorraden, mijnbouw en verrijking

De goedkoop winbare voorraden uranium zijn beperkt. Ze zijn echter voldoende om 100 jaar het huidige aantal reactoren te laten werken. De huidige produktie van 2.5×10^{12} kWh (of 9 EJe)¹⁹² aan elektrische energie per jaar kan dus 100 jaar worden volgehouden. De mijnbouw vereist veel grondverplaatsing, waarbij ook radioactief Radon vrijkomt. Dit Radon is een vervalproduct van U238 en heeft een levensduur van bijna 4 dagen. Door het mijnafval onderwater te plaatsen wordt bestraling van de plaatselijke bevolking voorkomen of verminderd.

Na de mijnbouw wordt het U235 gehalte van het U opgevoerd in verrijkingsinstallaties met behulp van fysische methodes als diffusie, ultracentrifuge of laserscheiding.

Opwerking en afval

De splijtstofstaven bevatten na ongeveer een half jaar, zoveel splijtingsprodukten en actiniden, dat veel neutronen worden ingevangen voordat ze de kans krijgen de kettingreactie te beginnen. De staven worden er dan uitgehaald met 2 opties:

- a) de schadelijke stoffen verwijderen en de weer schone U, eventueel samen met splijtbaar Pu opnieuw in een splijtstofstaaf aanbrengen (opwerking)
- b) de staven opslaan met, vooral in de beginperiode, goede koeling.

De eerste optie maakt beter gebruik van het U235 (en de gevormde Pu). Maar opwerking is een chemisch, en smerig, procedé. Bij ongelukken of terroristische aanslagen komt veel en gevaarlijk radio-actief materiaal vrij. Vandaar dat optie b) populair begint te worden¹⁹³. In beide opties a) en b) ontstaat er afval, waaronder de actiniden, die miljoenen jaren gevaarlijk blijven. Hun volume kan echter beperkt worden gehouden en er wordt gewerkt aan technologieën om een groot deel van de actiniden minder gevaarlijk

¹⁹² 1 EJ= 10^{18} J.

¹⁹³ The future of Nuclear Power, An Interdisciplinary MIT study, MIT, Cambridge, Mass, USA, 2003

te maken door gedwongen splijting¹⁹⁴. Het volume aan actiniden met een levensduur van meer dan een paar honderd jaar zou daarmee aanzienlijk beperkt kunnen worden en de opslag daarvan onder goede controles tot enkele, geologisch geschikte, plaatsen ter wereld worden beperkt.

In de reactor zelf ontstaan door het intensieve neutronenbombardement diverse materialen die ook weer radio-actief zijn. De meest bekende is Cobalt 60 met een betrekkelijk korte halfwaardetijd van 5 jaar. Na 100 jaar is de meeste radioactiviteit uit de reactor zelf verdwenen.

straling bij 'normaal gebruik'

Er komt bij praktisch alle onderdelen van de kernsplijtingscyclus enige straling vrij. Hoewel gering, voegt het toe aan de 'natuurlijke straling' die de mens ontvangt: kosmische straling en straling uit gesteenten. De effecten van zeer lage doses zijn (nog) niet te meten, ze vallen in het niet tegenover andere effecten. Internationale organisaties hanteren een 'veilige schatting' door aan te nemen dat men de effecten van wat grotere en wel meetbare doses lineair naar lagere doses kan extrapoleren. Hierbij wordt aangenomen dat er geen drempel is: iedere dosis heeft een kleine kans om extra schade aan onze cellen toe te brengen. Bij 'normaal gebruik' acht schrijver dezès de stralingsschade op te wegen tegen het voordeel van de elektriciteitsproductie¹⁹⁵. Er zijn echter groepen die ieder door de mens veroorzaakte toename van radioactiviteit onaanvaardbaar achten¹⁹⁶. Aan de andere kant zijn er groepen, die de hiergenoemde 'veilige schatting' een te strenge eis vinden, waardoor kernsplijting onnodig duur zou worden. Hier is dus een politieke uitspraak op zijn plaats.

proliferatie van kernwapens

Kernwapens kunnen worden geproduceerd uit U235 of Pu239. Het Verdrag tegen de Verspreiding van kernwapens (NPV) bevat een mechanisme waarbij het IAEA¹⁹⁷ toezicht houdt op het hele proces van verrijking tot afval. In ruil voor het afzien van de kernwapenoptie door niet-kernwapenstaten hebben de kernwapenstaten destijds (1968, van kracht in 1970) toegezegd de niet-kernwapenstaten te helpen bij het 'vreedzaam' toepassen van kernenergie terwijl ze beloofden zelf hun arsenalen te verminderen en op te ruimen¹⁹⁸. Van dit laatste is, zoals bekend, weinig terecht gekomen en de VS hebben onlangs besloten kleine kernwapens te ontwikkelen, die op het slagveld worden ingezet (vooral tegen diepliggende bunkers). Diverse landen achten zich niet langer verplicht van de kernwapenoptie af te zien en het is duidelijk dat een verdere uitbreiding van kernenergie met alles wat daarbij komt kijken de kans vergroot dat landen of terroristische groepen gebruik gaan maken van kernwapens. De vernietigende kracht

¹⁹⁴ Ook in Nederland vindt onderzoek plaats op dit terrein, zie Fysische uitdagingen bij de afbraak van kernafval, door Frodo Klaassen, Arjan Koning en Ronald Schram, Ned. Tijdschrift voor Natuurkunde, maart 2004, 94-97.

¹⁹⁵ Wij moeten wel voorzichtig blijven. Het is denkbaar dat bepaalde stoffen, zoals Sr, in het skelet worden ingebouwd en vanwege hun concentratie lokaal een grotere schade aanbrengen dan tot nu toe aangenomen.

¹⁹⁶ Diezelfde groepen achten straling voor medische toepassing meestal wel aanvaardbaar.

¹⁹⁷ International Atomic Energy Agency, het Internationaal Atoombureau, gevestigd te Wenen

¹⁹⁸ Artikel VI: Elk van de partijen verbindt zich te goeder trouw onderhandelingen te voeren met betrekking tot een spoedige beëindiging van de nucleaire bewapeningswedloop en tot nucleaire ontwapening—onder strenge en doeltreffende internationale controle.

van die wapens is groot, en er komt veel radio-actieve straling vrij met nadelige gevolgen voor de gezondheid van veel mensen, vaak nog lang na de explosie.

De directeur van de IAEA heeft onlangs aangegeven hoe de verspreiding van kernwapens kan worden tegengegaan¹⁹⁹. De verrijking van uranium en de opwerking van de 'verbrande' splijtstof zou evenals opslag van radio-actief afval moeten plaats vinden onder multinationale controle. Kernenergiesystemen zouden niet langer gebruik moeten maken van materiaal dat direct geschikt is om bommen van te maken. Ten slotte zouden de kernwapenstaten moeten accepteren dat geen nieuw splijtbaar materiaal voor hun explosieven wordt aangemaakt. Wellicht dat deze voorstellen worden besproken op de periodieke toetsingsconferentie van het NPT, die in 2005 weer plaats vindt.

De prijs van kern- elektriciteit

De ontwikkelingskosten van de huidige types kerncentrales zijn afgeschreven. Veel centrales zijn bedrijfszeker en leveren electriciteit tegen een prijs van 4 ct/kWh. Verlenging van de levensduur van een centrale, zoals bij Borssele, is financieel aantrekkelijk en wordt vaak gedaan.

Het bouwen van nieuwe centrales is dikwijls duurder dan het verlengen van de levensduur van bestaande. Dat zal de reden zijn waarom de IPCC publikatie een marge geeft voor de prijs van nucleaire electriciteit tussen 3.9 en 8 \$ct/kWh. De regering-Bush is van plan aan nieuw te bouwen kerncentrales een minimum afnameprijs te garanderen, waardoor investering in nieuwe centrales, met eventuele verbeteringen, interessant wordt²⁰⁰.

Samenvatting en conclusies voor traditionele kernenergie

Uitstoot

Er is alleen broeikasuitstoot bij de bouw van centrales, de mijnbouw, en ontmanteling. Kwantitatief is dit gering tegenover de vermeden uitstoot. Er komen wel veel langlevende actiniden vrij met weinig of geen opslagmogelijkheden. In de VS heeft men Yucca River als opslag aangewezen. Of dat wat wordt is dubieus, en sowieso is de opslagcapaciteit te klein. In Europa is vooral Finland bezig met het onderzoeken van de langdurige opslag²⁰¹ mogelijkheden voor kernafval. Finland is één van de weinige westerse landen die daadwerkelijk investeren in een nieuwe centrale²⁰². Daarbij wil men een optie creëren voor langdurige ondergrondse opslag van het afval van de 4 huidige centrales en twee potentieel te bouwen centrales. De opslag capaciteit zou voldoende zijn voor 40-60 jaar operatie van 6 centrales.

Implementatie

Geluidsoverlast is geringer dan bij fossiele centrales, ook al omdat kerncentrales dikwijls ver van grote steden staan. De maatschappelijke acceptatie is nog steeds gering (hoewel dat kan veranderen !), de bedrijfsrisico's liggen met name bij de opwerking, de hoge

¹⁹⁹ El Baradei in *The Economist*, 16 October 2003.

⁸ *New Scientist*, 9 Augustus 2003, 10-13

²⁰¹ Bron: STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland, http://www.stuk.fi/english/nuclear_materials/final_disposal.html

²⁰² De financiering wordt geregeld door de electriciteitsmaatschappijen, die daarmee de beschikking krijgen over kWh tegen een voor hen aantrekkelijke prijs. Zie: *The Economist*, 8 May 2004, 61-62

investeringskosten en de fluctuerende politieke en maatschappelijke opinie over kernsplijting. Een nieuw, groot ongeluk met een kerncentrale kan de publieke opinie weer jaren negatief beïnvloeden. De gezondheidsrisico's 'bij normaal gebruik' vallen voor de hele splijtstofcyclus binnen de internationaal overeengekomen normen.

Het is denkbaar dat de maatschappelijke acceptatie van kernsplijtingsenergie verandert in positieve richting. In Finland en Zwitserland is besloten om door te gaan, dan wel vooralsnog niet te stoppen met kernenergie. Daarnaast wordt sterk reclame gemaakt voor kernsplijting, tot in de NRC, zie hieronder. De regering-Bush is voornemens kernenergie met 15 miljard dollar te ondersteunen²⁰³.

Voorzieningszekerheid

Er is weinig volume aan Uranium nodig om een centrale te bedienen. Men kan dus gemakkelijk de brandstof, die nodig is voor een jaar productie, opslaan. Het oplazen van een kerncentrale of een opwerkingsfabriek is aantrekkelijk voor terroristen vanwege de angsten die dat zal produceren²⁰⁴. De proliferatie gaat door (zie N-Korea, Iran). Ook een politie-agent als de VS is niet in staat dit in de hand te houden, ook al niet omdat het morele gezag van dit land gering is. Het bedienen van een centrale en wat daarvoor en daarna met de radioactieve materialen moet gebeuren is niet eenvoudig en vereist gekwalificeerd personeel.

Potentieel

Er wordt met kernsplijting veel CO₂ uitstoot voorkomen. De voorraden goedkope Uranium, hoewel misschien groter dan tot nu toe aangenomen²⁰⁵, zijn beperkt. Het huidige niveau van 9 EJe per jaar aan kernelectriciteit zal wel voor 100 jaar voldoende zijn.

Duurzaamheid

Als de afgewerkte splijtstofstaven worden opgewerkt (de eerder genoemde optie a)) is er genoeg brandstof voor honderden jaren. Als wordt afgezien van opwerking (optie b) is de Uraniumvoorraad wel na 200 jaar uitgeput. Vanwege de beperkte Uranium voorraden wordt de duurzaamheid na 200 jaar niet hoog aangeslagen.

Ontwikkelingslanden

Ontwikkelingslanden zullen in hun steden voldoende technisch potentieel hebben om een centrale te bedienen. Ze hoeven niet het volledige systeem van mijnbouw tot afvalopslag in eigen land te voorzien, een deel van het systeem kan worden ingekocht. Het is echter geen goedkope optie en dient tegen andere opties te worden afgewogen.

Gelijkheid

Gezien de IAEA doelstellingen kunnen ook ontwikkelingslanden op kernsplijtingsenergie rekenen.

²⁰³ New Scientist, 9 Augustus 2003, 10-13

²⁰⁴ Kerncentrales en opwerkingsfabrieken liggen in 'no-fly'-zones, waar het verboden is te vliegen uit angst voor een terroristische zelfmoordaanslag. Toch komen militaire en civiele vliegtuigen soms dicht in de buurt, zie New Scientist, 29 May 2004, 8. De bescherming is dus niet waterdicht.

²⁰⁵ The future of Nuclear Power, An Interdisciplinary MIT study, MIT, Cambridge, Mass, USA, 2003

De Hoge Temperatuur Reactor, HTR – opstapje naar de vierde generatie (?)

Er zijn in het bovenstaande te veel minnen. Dus het is terecht dat de PvdA de traditionele kernenergie optie afwijst. En de Partij van de Arbeid staat hierin niet alleen. Dat zal de reden zijn waarom veel researchgelden worden uitgegeven aan ontwerpen, waarbij problemen rondom reactorveiligheid, afval en proliferatie worden opgelost of althans beheersbaar kunnen worden. Deze generatie IV reactors zouden rond 2030 in bedrijf kunnen komen²⁰⁶. Wij bespreken een voorloper van die ontwerpen, de HTR, die rond 2015 in bedrijf zou kunnen komen²⁰⁷.

Er wordt momenteel veel reclame gemaakt voor die HTR, de Hoge Temperatuur Reactor. Reeds tientallen jaren is deze reactor in studie maar thans wordt het ontwerp nieuw leven ingeblazen. NRC Handelsblad heeft een positief getinte wetenschapsbijlage gemaakt (16 Februari 2003), overgenomen uit een artikel geschreven door een aantal medewerkers uit de kernindustrie²⁰⁸. Momenteel staan er testreactors in Duitsland en China en wordt een proefreactor gebouwd in Zuid-Afrika. De ontwikkelingstijd van een commerciële centrale van 10 tot 12 jaar werd door de electriciteitsproducenten tot nu toe steeds te lang geacht om een bestelling te plaatsen. Dat kan anders worden als de subsidieplannen van de regering-Bush worden goedgekeurd.

In het meest besproken ontwerp bestaat de HTR reactor uit kleine bolletjes opgebouwd uit een mengsel van Thorium (Th) en U met grafiet (zuivere C12) om de neutronen af te remmen. De U235 zorgt voor neutronen, die Th omvormen tot U233, een splijtstof, die in de natuur niet voorkomt. Er wordt dus als het ware splijtstof gekweekt.

De kerncentrale - reactorveiligheid

In de reactor wordt door de warme bolletjes Helium (He) gas geblazen, wat voor de koeling zorgt. Dit He komt daardoor op een hoge temperatuur en drijft dan – zonder warmtewisselaar-onmiddellijk een turbine aan. Als er iets mis gaat, worden de bolletjes warmer, ze zetten uit, en de kettingreactie stopt vanzelf. Zonder menselijk ingrijpen. Dit is een plus. Men noemt dit inherente veiligheid, op basis van een fysisch principe.

Voorraden, mijnbouw, verrijking

U235 blijft nodig, maar daarnaast wordt Th gebruikt, waarvan grote voorraden zijn aangetoond, ongeveer even groot als van lood. Voor de U mijnbouw geldt hetzelfde als boven, de Th mijnbouw is vergelijkbaar met die van lood. Hoewel niet noodzakelijk, is het nuttig om U te verrijken tot 95% of hoger. Dan is er weinig U238 en er worden veel minder actiniden gevormd dan bij de traditionele kernreactor. Dit is opnieuw een plus. Een min is echter de hoge verrijking, tot bom-concentraties, waardoor controles lastiger – en essentiëler – worden.

²⁰⁶ Aan het generatie IV project werken mee Argentinië, Brazilië, Canada, Frankrijk, Japan, Korea, Zuid-Afrika, Zwitserland, Engeland, de Europese Unie en de Verenigde Staten. Zie: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, US DOE Nuclear Energy Advisory Committee and the Generation IV International Forum, December 2002.

²⁰⁷ De 'Technology Roadmap' geeft een schatting van 10 jaar vanaf eerste bestelling tot inbedrijfstelling. De 'Roadmap' geeft (pag 19) de hierboven behandelde versie van de HTR de naam PBMR = Pebble Bed Modular Reactor.

²⁰⁸ James A. Lake, a.o., Next-generation Nuclear Power, Scientific American, januari 2002, 71-79

Opwerking en afval

Het meest verstandige²⁰⁹ is om niet op te werken, maar de afgedankte splijtstofstaven na opslag te demonteren, en na chemische afscheiding van de geringe hoeveelheid actiniden alles naar de afval te sturen. Opwerking is niet nodig vanwege de grote voorraden Th.

straling bij normaal gebruik

Bij normaal gebruik vertonen de HTR's dezelfde stralingseffecten als lichtwaterreactoren, maar nu wordt ook de C12 in grafiet deels omgevormd tot C14, welke bèta straling afgeeft. Ook in de natuur komt C14 voor, gevormd door kosmische straling. Het 'extra' van de HTR is minstens een orde kleiner dan de natuurlijke C14 activiteit. De aanvaardbaarheid van deze extra straling is omstreden²¹⁰, Het zal leiden tot een – onbekend – aantal extra gevallen van tumoren.

proliferatie

De sterk verrijkte U235 vraagt goede controles. Daarnaast kan ook hier door kwaadwilligen in een reactor een staaf U238 worden gehangen. Na een paar weken is er flink wat Pu239 gevormd, maar nog weinig anders. Chemische scheiding levert bommateriaal Pu239. Dus opnieuw zijn controles en inspecties noodzakelijk.

kosten

Gezien de lange ontwikkelingstijden heeft de HTR alleen toekomst bij veel overheidsinvestering. Die investeringen zullen niet in de kWh prijs worden verrekend.

Samenvatting en conclusies

uitstoot

Vergelijkbaar met de traditionele kernsplijting

implementatie

De kans op een groot ongeluk met de HTR centrale is gering en opwerking kan achterwege worden gelaten. Het bijbehorende risico is dus afwezig. De maatschappelijke acceptatie kan vanwege 'het nieuwe' en de beloften van schone technologie groter zijn dan die van traditionele kernsplijting.

voorzieningszekerheid

De HTR is nog niet commercieel gerealiseerd en zal de gebruikelijke kinderziekten te boven moeten komen. Het systeem oogt complexer dan de traditionele centrales wegens de toevoeging van Th en de hoge verrijking van het U235. Mijn taxatie is dat de reactor zal werken, maar de kosten zijn onduidelijk. Het proliferatierisico is, zo mogelijk, groter dan bij de traditionele kernsplijting.

²⁰⁹ MIT, a.w., pag 5

²¹⁰ Er zijn deskundigen (Kees Andriessse) die dit onaanvaardbaar achten. Volgens de huidige hypothese, dat de kwalijke effecten van straling geen drempel hebben en lineair afnemen, veroorzaakt ook deze geringe extra straling, vanwege de lange levensduur van het C14, grote aantallen tumoren

potentieel

Vanwege de royale beschikbaarheid van Th en de verwachte ruimere beschikbaarheid van U zal de HTR (als hij werkt) wel 200 jaar kunnen draaien. Daarnaast is de temperatuur van de HTR reactor zo hoog dat het principe ook goed gebruikt kan worden om waterstof te genereren als brandstof van een waterstof-economie.

duurzaamheid, ontwikkelingslanden en gelijkheid

Als bij de traditionele kernsplijting. Er wordt echter meer efficiënt gebruik gemaakt van Uranium en daarom zal de houdbaarheid van dit procédé langer zijn.

Evaluatie HTR

Het systeem is 'beter' dan de traditionele lichtwaterreactor. Om de risico's van terrorisme en proliferatie te beperken is een sterk en betrouwbaar internationaal controle systeem nodig. Het NPV met de IAEA als uitvoerende instantie zal slechts werken, als de enige staat met macht (de VS) de internationale rechtsorde eerbiedigt – en aan zijn NPV-verplichtingen voldoet. Het is ondenkbaar dat de rest van de wereld gedurende lange tijd de VS als politieagent zal accepteren, als die 'politie-agent' zelf ongeloofwaardig wordt.

Evaluatie beide kernsplijtingsopties

Bij een goed werkend internationaal IAEA-NPV regime zou de HTR optie aantrekkelijk kunnen zijn. Het langlevende afval zou dan op een beperkt aantal plaatsen onder goede controles kunnen worden opgeslagen²¹¹. Onder de huidige omstandigheden zouden beide opties moeten worden afgewezen.

Het economische argument – de hoge kosten zonder overheidssteun – zal in de liberale electriciteitsmarkt als 'vanzelf' zorgen voor uitfasering van kernsplijting, hoewel de uitbreiding van kernsplijting in Finland plaats vindt zonder rechtstreekse overheidssteun²¹². De royale steun van de regering-Bush aan kernsplijting²¹³ zal de markt verder ondersteunen en het bouwen van veel nieuwe centrales in de VS zal zijn uitwerking op de rest van de wereld niet missen.

Bronnen²¹⁴ schatten in dat de bijdrage van kernsplijting aan de energievoorziening de komende 20 jaar in absolute termen hetzelfde blijft: minder in OECD landen, meer in ontwikkelingslanden. De rationale van die ontwikkelingslanden zou kunnen zijn: a) een eigen toegang tot de 'bom' krijgen b) het opbouwen van prestige, intern en extern, c) het ontwikkelen van een 'high-tech' kader en d) een bepaalde mate van onafhankelijkheid bereiken in de energievoorziening.

²¹¹ Het is, technisch gesproken, denkbaar dat generatie-IV reactoren inderdaad het volume overblijvend radioactief materiaal verminderen.

²¹² The Economist, 8 May 2004, 61-62

²¹³ MIT a.w., pag 7 pleit voor CO2 credits voor kernsplijting in de orde van 100 \$ per vermeden ton C. Ook dit is een marktcorrectie.

²¹⁴ IPCC 2001, Third Assessment Report, Vol: Mitigation, te printen vanaf www.ipcc.ch. Het meest essentiële is tabel 3.37, die ook te vinden is in de Summary for Policy Makers, table SPM.1.
2. Ralph E. H. Sims et al, Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation, *Energy Policy* 31 (2003), 1315-1326;

Nadere evaluatie door de groep (22-04-2004)

Tijdens de groepsdiscussie bleek dat de groep van oordeel is dat voorwaarden moeten worden geformuleerd over de condities waaronder kernsplijting een aanvaardbare energie-optie zou zijn. Dat betreft vooral de aspecten reactorveiligheid, proliferatie en radio-actief afval.

1. reactorveiligheid:

een kerncentrale moet inherent veilig zijn, dat wil zeggen: als de produktie van warmte toeneemt boven een bepaalde grens, dan moet de centrale vanzelf afslaan, op basis van fysische principes, en zonder menselijk ingrijpen. (*hierover bestond eenstemmigheid*)

2. proliferatie:

er moet een geloofwaardig en sterk anti-proliferatie regime zijn. De IAEA moet daartoe worden versterkt en de grote kernwapenstaten moeten – in overeenstemming met het Non-Proliferatie Verdrag – te goeder trouw onderhandelingen voeren om te komen tot beëindiging van de nucleaire wapenwedloop en tot nucleaire ontwapening. Populair gezegd: ze moeten bereid zijn kernwapens op te doeken als de rest van de wereld het ook doet.

Ook als Nederland of de EU zou besluiten af te zien van kernsplijting als energiebron, zal een sterk en geloofwaardig IAEA regime in stand gehouden moeten worden. Enerzijds omdat er altijd research reactoren blijven voor materiaalonderzoek en het maken van medische isotopen²¹⁵. Anderzijds, omdat er voor overzienbare tijd kernreactoren zullen blijven, zowel binnen als buiten de EU. Ten slotte, omdat ook de intense neutronenbundels die ontstaan bij kernfusie voor militaire doelen gebruikt kunnen worden.

(ook over dit proliferatie-aspect bestond overeenstemming)

3. afval:

het afval van het kernsplijtingssysteem (voorbereiding, elektriciteitsproductie en nazorg) moet binnen een overzichtelijke termijn gevaarloos worden. Hier moet men onderscheid maken tussen de splijtingsprodukten (de kernen die ontstaan door splijting van uranium of thorium en veel lichter zijn dan uranium) en de actiniden (die ontstaan door absorptie van meerdere neutronen in uranium en daarom veel zwaarder zijn dan uranium). De hoeveelheden waarover het gaat zijn niet extreem groot. Een 1000 MWe kernsplijtingscentrale levert per jaar 3 m³ kernsplijtingsafval in verglaasde vorm²¹⁶.

Over het criterium waaraan de verwerking van het radio-actief afval moet voldoen waren de meningen het meeste verdeeld. Hieronder zijn de standpunten systematisch weergegeven, van het ene uiterste naar het andere.

²¹⁵ In principe kunnen veel radio-isotopen ook gemaakt worden in cyclotrons. Maar dat gebeurt in een veel lager produktietempo. Bij grote produkties heeft men veel neutronen nodig die men ook weer kan gebruiken voor militaire doelen. Dus ook dan blijft de IAEA nodig.

²¹⁶ De werkkamer waarin de groep vergaderde heeft een inhoud van 52 m³ en is daarmee goed om 17 jaar het afval van zulk een grote centrale op te slaan.

- a) binnen één generatie moet alle straling zijn verdwenen, want wij mogen ons nageslacht niet opzadelen met de gevolgen van onze energie-gulzigheid
- b) alle straling moet zijn verdwenen binnen 100 jaar
- c) men moet onderscheiden tussen de splijtingsprodukten en de actiniden²¹⁷. Van de splijtingsprodukten moet het stralingsgevaar (officiële benaming: het radiotoxisch risico) na 300 jaar zijn afgenomen tot het niveau van het natuurlijk uranium²¹⁸. Van de actiniden moet 90 % worden verspleten (in kernreactors of versnellers).
- d) Als c), maar nu wordt geëist dat 95 % van de actiniden wordt verspleten

Technische toelichting:

- I. de actiniden zijn niet voor de volle 100 % kwijt te raken, waarschijnlijk wel voor 90 % of 95 %, al zullen de kosten toenemen met de eisen die men stelt.
- II. bij de besproken generatie IV kernsplijtingsreactors waarvan de HTR een voorloper zou kunnen zijn, is de uranium sterk verrijkt in U235, waardoor minder actinides ontstaan; het proliferatie gevaar wordt daardoor wel groter
- III. het is niet mogelijk aan criteria a) of b) te voldoen. Het is evenmin mogelijk de eis van 300 jaar in c) aan te scherpen tot bijvoorbeeld 100 jaar. Als men een van deze standpunten aanhangt moet verdere research zich richten op het verminderen van de risico's van het thans aanwezige afval en heeft research naar nieuwe reactor types geen zin.

opslaglocaties

Er moeten een beperkt aantal, geologisch betrouwbare opslaglocaties komen. De eis dat ieder land moet zorgen voor zijn eigen opslag leidt tot een onoverzichtelijke en daarmee risicovolle situatie.

²¹⁷ Deze zijn langs chemische weg te scheiden

²¹⁸ Frido Klaassen, Arjan Koning en Ronald Schram, Fysische uitdagingen bij de afbraak van kernafval, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, maart 2004, 94-97. Zie vooral figuur 1

5.2 Kernfusie door Marc Beurskens

Het principe van kernfusie

In de zon wordt energie opgewekt met behulp van kernfusie. Het doel is om fusie ook hier op aarde aan te wenden als energiebron voor het opwekken van elektriciteit. Kernfusie-energie is gebaseerd op het samensmelten van twee varianten (zogenaamde isotopen) van waterstof, deuterium (D) en tritium (T). In dit fusieproces wordt het lichte element helium (He) gevormd samen met een neutron (n) en een enorme hoeveelheid energie:



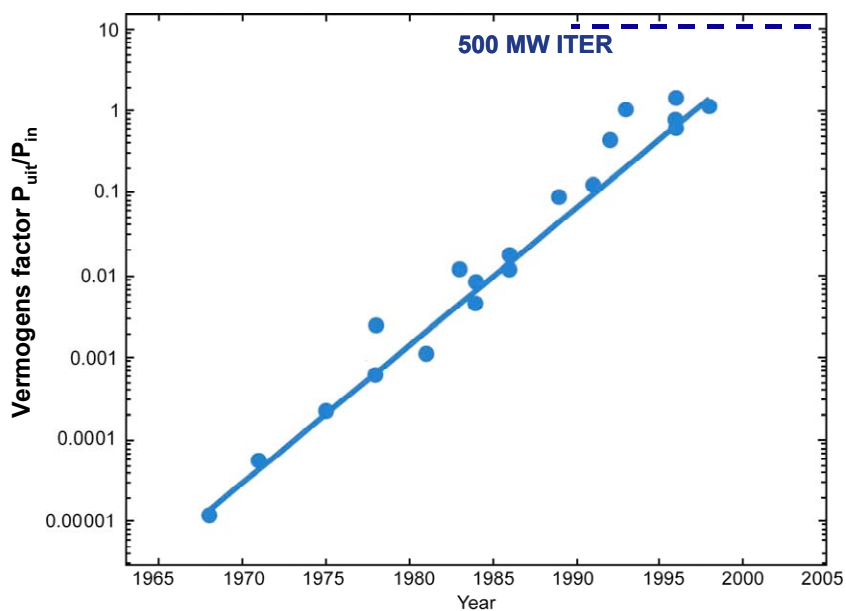
Om deze reactie op aarde te laten lopen moet het mengsel van deuterium en tritium verhit worden tot een temperatuur van 150.000.000 °C, 10 keer de temperatuur in de kern van de zon. Onder deze omstandigheden verkeert het fusiegas in een zogenaamde *plasma* toestand met losse ionen en elektronen. Omdat deze deeltjes elektrisch geladen zijn kunnen ze opgesloten worden in een magneetveld.

50 jaar fusie onderzoek

De beste configuratie tot nu is het tokamak concept. Het woord tokamak is een Russisch acroniem voor toroidale magnetische kamer; een 'doughnut'-vormige kamer met daarin het plasma opgesloten in een cirkelvormig magneetveld. De vooruitgang van kernfusie over de afgelopen 35 jaar is gestaag geweest, zoals getoond wordt in figuur 5.2-1. Met de huidige generatie kernfusie reactoren lukt het al om evenveel vermogen op te wekken als nodig is voor de verhitting tot 150.000.000 °C. Het hoogst opgewekte fusievermogen is gehaald met de JET tokamak in Engeland bij Oxford. Aldaar is gedurende 1.5 seconden 16 MW aan fusievermogen opgewekt. Met de nieuwe internationale reactor ITER, die gereed moet zijn rond 2015, moet een fusievermogen van 500 MW worden opgewekt gedurende een kwartier tot een uur. Hiervoor is een 'input' vermogen nodig van 50 MW, hetgeen wordt uitgedrukt in een vermogensfactor van 500:50 = 10.

De volgende ronde: proefmodellen

De netto energieproductie in een fusiereactor van het tokamak-type kan bereikt worden door schaalvergroting. Daardoor wordt de volume/oppervlakte verhouding van het fusie plasma gunstiger waardoor er naar verhouding minder energie het plasma verlaat, waarmee de warmte opsluiting verbetert. Dit betekent dat er relatief minder energie nog is om het fusie plasma op de benodigde hoge temperatuur te behouden. Het komt er op neer dat de warmte opsluiting schaalt met kwadraat van de afmeting van de reactor. Groter is dus beter in het geval van een fusie centrale. De nieuwe te bouwen machine ITER is twee maal zo groot als JET in Oxford, en heeft daardoor een 8 maal groter volume. ITER zal 500 MW aan thermische energie produceren terwijl er maar 50 MW ingestopt hoeft te worden. In termen van warmteproductie gedeeld door warmtetoevoer zal ITER een vermogensfactor hebben van 10 (Figuur 5.2-1). Hiermee zal voor het eerst aangetoond moeten gaan worden dat netto energie productie met kernfusie mogelijk is.

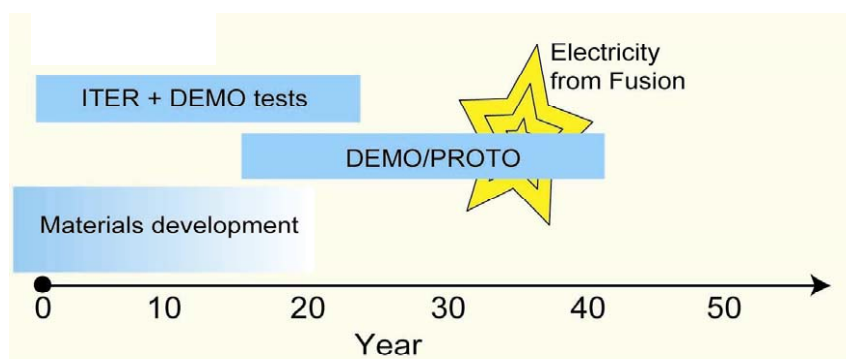


Figuur 5.2-1: voortgang in fusie. Tegenwoordig lukt het om evenveel vermogen op te wekken met kernfusie als er ingestopt moet worden voor de verhitting van het fusiegas. De vermogensfactor, d.w.z. de verhouding tussen het geproduceerde (P_{uit}) en het verbruikte vermogen (P_{in}) is elke 1.8 jaar verdubbeld sinds 1970. De volgende generatie fusie-experimenten moet met ITER een vermogens vertienvoudiging bewerkstelligen.

Na ITER zal er een eerste prototype DEMO/PROTO elektriciteitscentrale gebouwd gaan worden. Deze reactor zal nog net iets groter moeten zijn dan ITER om ook een vermogensfactor te bewerkstelligen in termen van geproduceerde elektriciteit, immers de omzetting van warmte in elektriciteit vindt plaats bij een efficiëntie kleiner dan één, namelijk bij 30-40%. Het wordt beoogd dat DEMO/PROTO een vermogen van 1 GW aan elektriciteit op zal wekken, wat vergelijkbaar is met dat van een grote kolen elektriciteitscentrale.

Als de research en politieke besluitvorming (met name op het punt van de financiering van het project) gladjes verlopen kan het tijdspad van nu tot elektriciteitsproductie met DEMO/PROTO in 35 jaar belopen worden. Figuur 5.2-2 laat een beknopte tijdsplanning zien. Een groot gedeelte van de tijd gaat zitten in de bouw van ITER en een eerste elektriciteitscentrale. Voor beiden wordt een bouwtijd van zo'n 10 jaar beoogd. Na DEMO/PROTO zou kernfusie klaar zijn voor commercialisering. Rond 2050 kunnen dan de eerste commerciële fusie centrales verwacht worden.

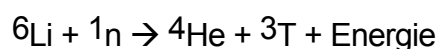
Wil de ontwikkeling van kernfusie succesvol zijn dan zal er parallel aan de ontwikkeling van ITER en DEMO/PROTO ook een experiment op het gebied van materiaal onderzoeks opgezet moeten worden. Het is zaak om tegen de tijd dat fusie commercialiseert materialen beschikbaar te hebben voor het constructiemateriaal (vacuümvat etc.) dat niet langdurig radioactief (zie verderop in de tekst) wordt en tegelijkertijd haar stevigheid houdt. Daarnaast moet er materiaal ontwikkeld worden voor de zogenaamde eerste wand, die het plasma ziet. Deze wand moet goed bestand zijn tegen de warmte en deeltjes stroom uit het plasma.



Figuur 5.2-2: Tijdsplanning voor fusie-energie. Jaar nul is het moment waarop de internationale toestemming en financiering tot bouw van ITER is verkregen.

Brandstof

Kernfusie brandstof is wijd verspreid op aarde te vinden. Deuterium kan gevonden worden als isotoop in 0.015% van alle waterstof op aarde, wat genoeg is voor miljarden jaren energiegebruik tegen het huidige consumptieniveau. Tritium komt niet in de natuur voor omdat het verval met een halfwaardetijd van 12.3 jaar. Het kan wel heel gemakkelijk geproduceerd worden uit het element lithium, wat ook weer overal op aarde in grote hoeveelheden gevonden kan worden. Ook Nederland heeft een grote voorraad lithium in de voormalige Boekelo zoutmijnen. Tritium kan in de reactor zelf geproduceerd worden, en hoeft dus niet getransporteerd te worden. De reactie om tritium te produceren uit lithium is exotherm. Dit wil zeggen dat er nog extra energie vrij komt bij de productie van tritium. De reactie gaat als volgt:



Voor een 1GW reactor is op jaarbasis 100 kg deuterium nodig en 150 kg tritium. Het afvalproduct van de fusiereactie is dus 250 kg helium uit de D-T reactie en evenveel uit de Li → T reactie. In totaal dus 500 kg He op jaar basis.

veiligheid

Een fusiereactor is een inherent veilige elektriciteitscentrale. De fusie relevante condities bij een temperatuur van 150.000.000 °C zullen instantaan verdwijnen als het magnetische evenwicht wordt verstoord. Het fusieplasma zal afkoelen waardoor er geen fusiereacties meer plaats zullen vinden. De energie-inhoud van het plasma is altijd zo laag dat de reactorwand niet kan smelten mocht de magnetische opsluiting plots verdwijnen. In een fusie reactor kunnen dus geen kettingreacties of “meltdown” condities ontstaan.

De tritium brandstof is radioactief en moet dus met zorg behandeld worden. Op elk gegeven moment is er niet meer dan 1.5 kg tritium aanwezig in de centrale. Mocht dit in allemaal in één keer vrijkomen dan moet de directe omgeving met een straal van zo'n 5 tot 10 km van de centrale voor een paar dagen ontruimd worden. Het vluchtige tritium zal na die paar dagen zo verdund in de atmosfeer aanwezig zijn, dat gevaar voor de volksgezondheid verdwenen is. De benodigde veiligheidsmaatregelen en restricties komen overeen met die van de zware chemische industrie.

Vervolgens geldt dat de neutronen uit de fusiereactie, verantwoordelijk voor energieproductie, door de reactorwand heen vliegen en daarmee deze wand radioactief

maken. De mate van activering van de wand hangt af van het gekozen wandmateriaal. Aan het eind van het leven van een fusiecentrale is de reactor radioactief. Indien standaard roestvrij staal gebruikt is voor de constructie dan geldt dat de activering alweer na 100 jaar erg laag is, en op hetzelfde niveau zit als de activiteit van al het kolen-as van een 1GW kolencentrale (totaal geproduceerd na 30 jaar operatie. Dit is ongeveer 10 keer de natuurlijke achtergrond straling). Indien andere materialen worden gebruikt zoals Vanadium dan is die activering al na 50 jaar gedaald tot het kolenas-niveau. Er zijn ook ontwikkelingen gaande om de wand van silicium-verbindingen te maken, waardoor geen enkele activering plaatsvindt.

Een ander aandachtspunt is de productie van het langdurig radioactieve element C14 (Zie hoofdstuk 5.1) . De productie van dit element kan geminimaliseerd worden als er gewerkt wordt met staal dat slechts weinig stikstof bevat en water als koelvloeistof wordt vermeden. Het is namelijk zo dat stikstof en zuurstof makkelijk omgezet kunnen worden in C14 indien ze met neutronen worden gebombardeerd. De reactor zal gemaakt moeten worden van speciaal staal en in plaats van water (waar zuurstof in zit als H₂O) helium als koelvloeistof gebruiken. Dit heeft als extra voordeel dat de koeling bij hogere temperatuur plaats kan vinden waardoor het omzetten van warmte naar elektriciteit efficiënter wordt.

Als laatste aandachtspunt geldt de proliferatie van nucleaire brandstof. Een fusie centrale hoort geen uranium of plutonium te bevatten. De neutronenflux in en rond de centrale is echter zo hoog dat uit het ongevaarlijke U238 de splijtstof Pu239 kan worden gevormd. Hier geldt echter dat er eenvoudiger en minder zichtbare wegen zijn om splijtstoffen te maken. De centrale is technologisch niet eenvoudig en vereist zorgvuldig management en behoedzaam opereren.

Kosten

Zoals eerder aangegeven zijn de afmetingen van een fusiecentrale belangrijk om voldoende efficiëntie voor de elektriciteitsproductie te creëren. De minimum grootte voor een fusiecentrale is zodanig dat hij 1GWe aan elektrisch vermogen levert. De initiële investeringskosten betreffen ongeveer 60 % van de uiteindelijke elektriciteitsprijs. De volgende grootste kostenposten zijn het onderhoud en operatie van de reactor. In periodes van één tot twee jaar zal de binnenwand van de centrale vervangen moeten worden, wat ongeveer 30% van de elektriciteitsprijs bepaalt. De brandstofkosten zijn erg laag in verhouding tot de investeringen (1-2% van de elektriciteitsprijs). Daarmee is kernfusie een investeringsintensieve energie bron. De allereerste fusie reactor zal elektriciteit kunnen leveren tegen een prijs van zo'n 15 €cent/kWh. Uitgaande van een leereffect van 15-20% per verdubbeling zal de tiende reactor elektriciteit uit kernfusie kunnen leveren voor een prijs tussen de 8 en 10 €cent/kWh.

Internationale samenwerking

Kernfusie onderzoek is inherent een internationaal onderzoek. Momenteel nog vooral op Europese schaal, maar binnen kort met ITER op internationale schaal. De zes partners die aan ITER meedoen zijn de EU, Japan, China, Rusland, Zuid-Korea en de VS. De investeringskosten van 5 Miljard Euro voor de bouw van ITER over een periode van 15 jaar zullen onder de partners verdeeld worden. Momenteel zijn er nog twee potentiële locaties voor ITER. De EU wil ITER heel graag geplaatst hebben in Zuid-Frankrijk in Cadarache, de Provence, 100 km ten noorden van Marseille. Zowel Rusland en China steunen Europa in deze locatie keuze. De concurrerende locatie is in Noord Japan in

Rokkashu-Mura. Japan heeft de steun van de VS en Zuid-Korea. Deze 3-3 patstelling lijkt een snelle start met het begin van de bouw te vertragen.

ITER is het eerste experiment ooit dat op zo'n grote internationale schaal gedragen wordt. Tegelijkertijd bepaalt dat grotendeels de vertraging in het ontwikkelingsproces van kernfusie. Waarschijnlijk zal ITER ook het laatste experiment zijn dat volledig met overheidsmiddelen gefinancierd wordt. Het lijkt erop dat als ITER succesvol aantoont dat netto energieproductie met fusie mogelijk is, participatie van grote energiebedrijven in de volgende stap DEMO niet uitgesloten is.

Samenvatting en conclusies

uitstoot

De enige emissie van broeikasgassen vindt plaats bij de constructie van de fusiecentrale. Het produceren van de fusie-elektriciteit gebeurt zonder uitstoot en de radioactiviteit van de centrale zelf levert 100 jaar na het stopzetten van de centrale geen gevaren voor de gezondheid meer op.

implementatie

Het ruimtebeslag van een fusiecentrale is geringer dan dat van een steenkoolcentrale, er is geen geluidsoverlast. Er zullen koeltorens nodig zijn, maar er is geen risico van een groot ongeluk of een gezondheidsrisico bij normaal gebruik. De maatschappelijke acceptatie is beperkt, waarschijnlijk omdat fusie meer voorbereiding nodig heeft en geen snel beschikbare energiebron is.

voorzieningszekerheid

Het volume van de brandstof is gering, er kan veel worden opgeslagen en in veel landen kan de lithium worden gevonden; het deuterium kan via elektrolyse overal worden geproduceerd. Een fusiecentrale is niet het meest aantrekkelijke doelwit voor terroristische acties, aangezien verspreiding van tritium in de atmosfeer slechts beperkt angst zal opwekken. De elektriciteit die ze levert kan aan het net worden toegevoerd en het vermogen kan op een termijn van uren worden gevarieerd. Ze zijn dus geschikt voor het verzorgen van de basislast van het net.

potentieel

Als de fusiereactor inderdaad betrouwbaar blijkt te werken, is ze een goede kandidaat voor reductie van CO₂ uitstoot en heeft gezien de overvloedig aanwezige 'brandstof' veel groeimogelijkheden.

duurzaam

De fusiecentrale kan daarmee onderdeel zijn van een duurzame samenleving, ook op de langere termijn.

ontwikkelingslanden

In stedelijke gebieden met een grote vraag naar elektrisch vermogen is de fusiereactor op zijn plaats. In dun bevolkte, landelijke gebieden zijn andere energie opties beter geschikt.

gelijkheid

Fusie blijft een lastige technologie. Haar bijdrage aan 'gelijke toegang tot energie' is indirect, doordat ze energie overvloediger maakt en daarmee de kansen voor de armere op energie vergroot.

Evaluatie

Kernfusie is in principe een ideale energiebron. Het is schoon, veilig, en de brandstof is wijdverspreid aanwezig. Het grote nadeel is dat de technologie nog niet voorhanden is voor energieopwekking in de komende decennia. Daarna zou fusie echter een uitermate belangrijke rol kunnen gaan spelen. Het feit dat er nog geen andere technologieën zijn waarmee het energieprobleem definitief opgelost kan worden is al voldoende reden om het fusie onderzoek voort te zetten. Een consistent beleid, met name jegens de financiering is dan absoluut noodzakelijk.

6 Synthese

In dit hoofdstuk worden de gegevens uit de vorige hoofdstukken bij elkaar gebracht. De sympathie van de groep ligt zonder meer bij hernieuwbare bronnen van energie. Daarom worden de problemen van opslag en ruimtebeslag nogmaals geanalyseerd en gekwantificeerd, met name voor zon, wind en biomassa. Uit hoofdstuk 1, de inleiding worden projecties voor het energieverbruik in de EU-15 afgeleid en wordt nagegaan hoe de energievoorziening in de jaren 2050 en 2100 er zou kunnen uitzien. In hoofdstuk 6.1 worden twee eenvoudige scenario's beschreven met de beeldende namen 'alle zeilen bijzetten' en 'gekissebis'. Deze zijn opgesteld om de politieke keuzemogelijkheden te verduidelijken. Daartoe worden in tabel 6.1.5 'redelijke' schattingen gemaakt en onbekende bijdragen even open gelaten. Het blijkt dat EU-15 bij voldoende inspanning en politieke daadkracht het 'alle zeilen bijzetten' scenario kan volgen, waarbij tot 2100 geen groot probleem in de energievoorziening hoeft te zijn en de inzet van kernsplijting niet nodig is.

Voor de EU-25 als geheel is nog geen gedetailleerd statistisch materiaal voorhanden zoals voor EU-15; ook zijn er weinig of geen projecties in de toekomst op dit aggregatieniveau. Ten slotte is de huidige EU-25 meer divers dan de oude EU-15. Dat waren de redenen om ons in de huidige analyse te beperken tot EU-15. In eerste instantie wordt niet verwacht dat de uitbreiding van EU-15 naar EU-25 veel aan de conclusies voor het onderdeel EU-15 zal veranderen.

In hoofdstukken 6.2 en 6.3 wordt geprobeerd een optimale energievoorziening voor 2010, 2020, 2050 en 2100 te vinden. Een optimum wordt gevonden door elke energie-optie te beoordelen op een 17-tal aspecten, vastgesteld op grond van de groepsdiscussie en in woorden beschreven aan het einde van elke optie in de voorgaande hoofdstukken. Hoofdstuk 6.2 is een inleiding op de kwantitatieve analyse van hoofdstuk 6.3. Het resultaat is gegeven in tabellen 6.3.6 en 6.3.7.

In hoofdstuk 6.4 worden enkele korte beschouwingen gewijd aan China als typisch voor een zich snel ontwikkelende 'Derde Wereld'-economie.

6.1 Implementatie van hernieuwbare bronnen in 2050 en 2100 door Egbert Boeker

In de onderstaande paragrafen worden zon-PV, wind en biomassa beschreven als componenten van een hernieuwbare energievoorziening. De optie om zonnestraling te concentreren met spiegels en de hitte te gebruiken om elektriciteit op te wekken laten we hier buiten beschouwing²¹⁹. Wij bespreken

- de middelen om grote hoeveelheden elektrische energie op te slaan en te transporteren; deze gegevens zijn nodig vanwege de schommelingen van de opbrengst van PV, wind en –in mindere mate – biomassa naar plaats en tijd

²¹⁹ Deze optie is vooral voor de zuidelijkste EU landen relevant. Zie New Scientist, 10 April 2004, 26. De opgewekte elektrische energie per km² zal niet groter zijn dan de in dit hoofdstuk gegeven analyses voor PV.

- de opbrengsten per km² van zon, wind en biomassa op het niveau van wereld, EU-15 en Nederland; hiermee kan een schatting worden gemaakt van het ruimtebeslag van de bronnen van hernieuwbare energie.
- de energie-opties voor EU-15 in 2050 en het corresponderende ruimtebeslag van de hernieuwbare bronnen
- het opzetten van proefparken van hernieuwbare energie in Nederland

Wij gaan uit van de huidige stand der techniek en geven aan wat binnen de fysische randvoorwaarden nog verder kan worden bereikt²²¹.

De notatie van energie eenheden is zoals elders in dit rapport. Elektrische Joules zijn genoteerd als Je. Overige Joules als J. Waar wordt geprobeerd ze tot elkaar te herleiden wordt aangegeven hoe dat gebeurt. Voor het overige zijn de afkortingen aangegeven op de achterzijde van de titelpagina.

Turf is een zeer verwarmende, schone, duurzame en in onze Luchtstreek zeer gezonde brand

Bron: Turfgraverij, Uit: Vaderlandsch A-B boek voor de nederlandsche jeugd, Amsterdam, W. Holtrop, 1781

Opslag en transport van elektrische energie

De vraag naar elektriciteit fluctueert van dag op nacht en van zomer op winter. Het aanbod van veel hernieuwbare energiebronnen zoals zon-PV en wind fluctueert sterk in de loop van een dag, onafhankelijk van de vraag naar elektriciteit. Ook het aanbod van biomassa varieert, in dit geval met de seizoenen.

De fluctuatie van de elektriciteitsvraag bestaat al lang en de samenstelling van de eenheden voor elektriciteitsproductie is hierop afgestemd. Naast centrales die permanent draaien op goedkope brandstof zoals kolen, zijn er centrales die branden op duur aardgas, die snel aangezet of uitgezet kunnen worden.

Een andere methode is om indien mogelijk, in tijden van veel aanbod de elektriciteit op te slaan om die bij veel vraag naar elektriciteit weer te leveren. Dat gebeurt onder andere in Frankrijk waar het grote aantal kerncentrales om technische redenen permanent moet draaien. Er wordt daarom onder andere in de Franse Alpen 's nachts water omhoog gepompt dat overdag weer hydro-elektriciteit oplevert²²².

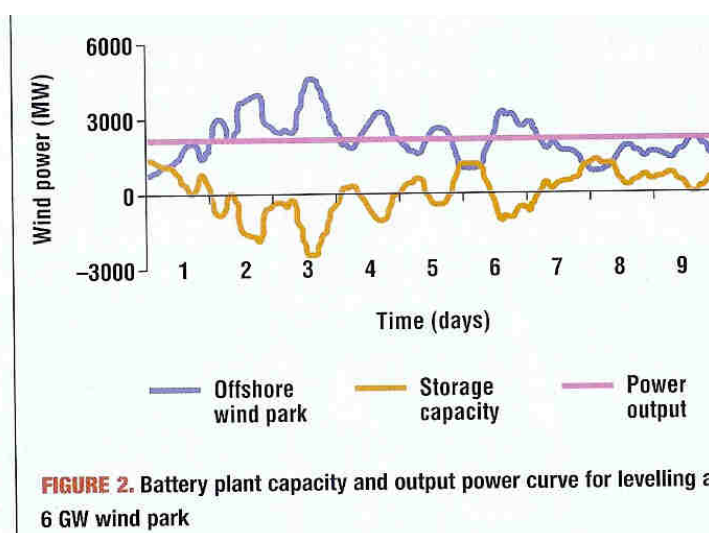
Het inzetten van fluctuerende energiebronnen betekent variatie niet alleen aan de vraagzijde, maar ook aan de aanbodzijde. Dat vraagt dus om extra voorzieningen. Wij bespreken in verband met de variatie van vraag en aanbod achtereenvolgens het aanvaardbare percentage netfluctuatie, enkele opslagmogelijkheden voor elektriciteit: water, perslucht, batterijen en waterstof en ten slotte de kosten van elektriciteitstransport.

²²¹ De schrijver van dit hoofdstuk is zo eigenwijs van mening te verschillen met Karl Marx. Deze schrijft in 'Das Kapital', IV Abschnitt, 13 Kapitel, "Mirabeaus 'Impossible? Ne me dites jamais ce bête de mot' gilt namentlich für die moderne Technologie". Ook de volgelingen van Marx zijn gebonden aan de randvoorwaarden die de fysica stelt.

²²² Daarnaast exporteert Frankrijk veel stroom, o.a. via een zware gelijkstroomkabel naar Engeland onder het kanaal bij Calais.

Fluctuatie in het net

Gedurende een dag fluctueert de elektriciteitsvraag. In grote lijnen is dat voorspelbaar en kan men tijdig centrales aankoppelen. Die centrales moeten goedkoop zijn in aanschaf (omdat ze maar weinig uren draaien) en mogen duur zijn in brandstofverbruik (opnieuw omdat die brandstof slechts korte tijd wordt gebruikt). In de praktijk zijn dit meestal gasturbines, al kunnen ook waterkrachtcentrales snel worden aan- en uitgezet.



Figuur 6.1.1 De opbrengst van een windpark (op zee) met 6 GW opgesteld vermogen varieert sterk met de tijd (bovenste kromme). Door vermogen af te voeren of aan te voeren via een opslagcapaciteit (onderste kromme) kan men een stabiele opbrengst bereiken²²³. In dit geval is de nodige opslag 62 GWh = 0.223 PJe

Naast voorspelbare fluctuaties zijn er de kleinere, onvoorspelbare. Regeltechnici hebben geleerd een paar procent onvoorspelbare fluctuatie op te vangen, door in hun fossiele centrales meer of minder brandstof toe te voeren²²⁴. Als de onvoorspelbare fluctuaties in de vraag en de onvoorspelbare fluctuaties in het aanbod niet zijn gecorrigeerd, zullen beperkte fluctuaties in het aanbod, evenals kleine fluctuaties in de vraag, zonder extra capaciteit op deze manier door 'het net' kunnen worden opgevangen²²⁵.

Figuur 6.1.1²²⁶ geeft een indruk van de fluctuatie in het vermogen aan windenergie, zoals berekend voor een groot windpark in de Noordzee. Men ziet dat een nominaal opgesteld vermogen van 6 GW een permanent vermogen kan opleveren van ongeveer 2.5 GW, mits er opslag wordt geregeld van nog eens 2.5 GW gedurende ongeveer 20

²²³ Joh. H. R. Enslin e.a., Wind in store for the future, Renewable Energy World, jan-febr 2004, 104-113, Fig 2

²²⁴ Stroomversnelling, de volgende elektrische innovatiegolf, J. M. Meij, red., Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag 1999, nr STT 61. Zie pag 130.

²²⁵ Deze regelwijze vereist wel dat er fossiel vermogen in gebruik is. Als men de elektriciteit uitsluitend hernieuwbaar wil opwekken zal er opslagvermogen aanwezig moeten zijn.

²²⁶ Johan H. R. Enslin e.a., a.w., Fig 2

uur. De nauwkeurige berekening komt uit op 62 GWh= 0.223 PJe aan benodigde opslagcapaciteit ²²⁷.

Zoals in hoofdstuk 3.1 gememoreerd, leest men vaak dat 20 % van de elektriciteitsvoorziening door fluctuerende bronnen kan worden geleverd, en men verwijst naar Denemarken met een windbijdrage van een kleine 20%. Hierbij passen enkele kanttekeningen:

- De bedoelde 20 % is geen net-fluctuatie. Immers de windsnelheid in grootte en richting is redelijk goed voorspelbaar op een termijn van 24 uur²²⁸ en nog beter op een termijn van 6 uur²²⁹. Ook de onvoorspelbare netfluctuaties in Denemarken zullen veel kleiner zijn dan 20 %
- Als de wind wegvalt, is er wel degelijk produktie capaciteit nodig ('back-up'; in het nederlands: reservecapaciteit). In Denemarken wordt dan geleverd uit Noorwegen (vooral elektriciteit uit waterkracht). Dat moet betaald worden en de vragende partij (in dit geval Denemarken) zal de gevraagde prijs moeten betalen.
- Elektriciteit uit de reservecapaciteit zal via het net worden vervoerd.

Is het misschien zo dat het waait in Duitsland, als het in Nederland windstil is ? Want dan kunnen we de paar honderd kilometer uit Duitsland gemakkelijk het hoogspanningsnet overbruggen. Neen, uit Fig. 3.1.3 blijkt dat de windkracht over grote gebieden is gecorreleerd. Men moet elektrische energie dus over zeer grote afstanden vervoeren om er voor te zorgen dat deze fluctuaties elkaar opheffen.

De conclusie moet zijn dat bij elektriciteit uit zon-PV en wind reservecapaciteit moet worden gepland in de vorm van één of meer van de volgende voorzieningen

- extra centrales, goedkoop in aanschaf en snel aan- en uit te zetten
- opslag van energie zodanig dat de opgeslagen energie snel in elektriciteit is om te zetten
- import van hernieuwbare elektrische energie over zeer grote afstanden

De kosten van deze reservecapaciteit dienen in de kosten van de hernieuwbare energiebronnen te worden opgenomen.

Opslag van elektrische energie

Wij bespreken achtereenvolgens opslag in opgepompt water, in perslucht, in batterijen en in waterstof. De resultaten in MJ/L worden weergegeven in tabel 6.1.1, waar ze worden vergeleken met benzine, om de getallen wat 'dichter bij huis' te brengen.

²²⁷ Enslin, a.w., p. 108

²²⁸ Het ECN in Petten heeft een windaanbodvoorspeller ontwikkeld voor de meetmast Petten. Men kan dat raadplegen voor een voorspelling in grootte en richting voor de komende 48 uur, zie www.ecn.nl/avde/petten.nl.asp. Opmerkelijk is de grote variatie in windsnelheid op de meeste dagen.

²²⁹ Daarom zijn windenergieproducenten voorstander van het verhandelen van elektriciteit op een termijn van 6 uur in plaats van de thans gangbare minimaal 24 uur.

opslag in opgepompt water

Bij opslag in opgepompt water moet men schematisch denken aan twee (stuw) meren boven elkaar, verbonden door twee buizen. Door de eerste buis kan water worden opgepompt door de andere buis stort water naar beneden, hetgeen turbines aandrijft. Het onderste meer zal zelf ook weer water via turbines naar een lager gelegen punt laten stromen om hydro-elektriciteit te leveren. Er is dus competitie tussen opslag (latere stroomlevering) en onmiddellijke stroomlevering.

Een voorbeeld wordt geleverd door een systeem in de Belgische Ardennen. De beide meertjes hebben een hoogteverschil van 250 meter. Het bovenste meer kan in 8 uur worden gevuld uit het onderste en het kan in 6 uur weer leeglopen in het onderste meer met 440 m³ water per seconde; dat levert gedurende die uren een vermogen van 1100 MW²³⁰. De efficiency van het geheel, dus van het oppompen en daarna weer elektriciteit opwekken bedraagt 75 %.

Binnen de EU-15 bestaat 26 % van de capaciteit aan waterkracht uit opgepompt water²³¹; van de elektriciteitsproductie uit waterkracht bestaat 7 % uit opgepompt water²³². Het verschil zal toegeschreven moeten worden aan de aan- en afvoer van water in de reservoirs gedurende de seizoenen en de hierboven genoemde competitie.

In West-Europa (ongeveer EU-15) is rond 50% van het hydro-potentieel al benut, in Oost-Europa is dat 10 %²³³. Het BNP in de Oost-europese landen is nog veel lager dan dat van EU-15. Men kan dus aannemen, dat die landen het eigen hydro- en opslagpotentieel in eerste instantie voor de eigen behoeften zullen uitbreiden²³⁴. Natuurlijk kan via de 'markt' elektriciteit uit Oost-Europa worden aangekocht. Maar als er onvoldoende capaciteit is, wordt daarmee het probleem slechts verschoven.

In de EU-15 was in 2001 de opbrengst van elektriciteit uit opgepompt water gemiddeld 2.7 GWe. Van windvermogen was de gemiddelde opbrengst 3.1 GWe²³⁵. Stel dat de wateropslagcapaciteit kan worden verdubbeld, en dat die volledig bestemd wordt om fluctuaties in windvermogen op te vangen, dan zou – in eerste benadering – het windvermogen kunnen verdubbelen. Maar niet veel méér, en daarom is alleen hydro-opslag binnen de EU-15 onvoldoende om windenergie een grote rol in de energievoorziening te geven.

opslag in perslucht

Perslucht heeft zelfs bij een druk van 200 atmosfeer een energie-inhoud van slechts 6.5 kJ/L, een factor 385 kleiner dan waterstof met dezelfde druk (zie tabel 6.1.1). Hoewel de techniek van samendrukken en expansie bekend en goedkoop is, is perslucht niet geschikt om grootschalige fluctuaties in zon en wind te ondervangen²³⁶.

²³⁰ www.geo.vu.nl/~rondeel/ardennenweb/trois-ponts.html. In dit geval zijn er 2 hooggelegen bekkens.

²³¹ Renewables Information (2003), International Energy Agency, pag 74, table 2

²³² Renewables information, a.w. pag 75, table 3.

²³³ Steve Fetter, Climate Change and the transformation of World Energy Supply, Stanford, May 1999, pp 40, 41, tables 11 and 12

²³⁴ Volgens Poolse bronnen (Prof Th Szoplik) is het, uit milieu overwegingen) twijfelachtig of in Polen het hydropotentieel met een factor 10 kan worden opgevoerd. Voor landen met meer bergen ligt dit misschien anders

²³⁵ Renewables Information, a.w., p 74 en 75.

²³⁶ Egbert Boeker and Rienk van Grondelle, *Environmental Physics*, Second Edition, Wiley 1999, Exercise 4.22

opslag in batterijen

Batterijsystemen worden thans al gebruikt om kleine fluctuaties in het net op te vangen door elektriciteit op te nemen of af te staan²³⁷. Naast de bekende loodaccus zijn diverse systemen in ontwikkeling die zgn. redoxvloeistoffen aanvoeren of afvoeren naar een centrale cel. Voor de ouderwetse loodaccu is de energiedichtheid thans nog het grootste²³⁸.

De energiedichtheid voor de loodaccu van 300 kJ/liter is opgenomen in tabel 6.1.1. Om het vermogen van een 6000 MWe windpark op zee af te dempen, zoals beschreven in Figuur 6.1.1 is een 743000 m³ aan batterijen nodig²³⁹. dat komt overeen met een terrein van 200 bij 200 meter (4 ha) en een hoogte van 19 meter. Dat is niet onmogelijk.

opslag in waterstof

In een recente studie ten behoeve van de britse regering²⁴⁰ zijn diverse opslagmogelijkheden voor schommelende energiebronnen als zon en wind op een rijtje gezet. De studie concludeert dat waterstof de beste mogelijkheden biedt, ook al omdat voor het uitdempen van seizoenschommelingen tijdelijke opslag in lege of halflege gasvelden een enorm potentieel heeft.

Bij opslag van elektriciteit in waterstof moet de waterstof eerst worden geproduceerd uit water via elektrolyse en dan, op het moment dat stroom wordt gevraagd via een brandstofcel weer worden omgezet in elektriciteit. De totale efficiency elektra→waterstof→elektra bedraagt op zijn best 42%²⁴¹. De kosten van het proces zijn momenteel nog hoog en er worden vraagtekens gezet bij de veiligheid van waterstofopslag.

vergelijking van de opslagmogelijkheden

In tabel 6.1.1 wordt de energie-inhoud voor diverse opslagmogelijkheden aangegeven. In dit hoofdstuk gaat het met name om opslag van de energie uit hernieuwbare bronnen. Biomassa kan men laten zoals het is, in ruwe vorm dus, met een energie-inhoud van ongeveer 9 MJ/L. Het zal dikwijls beter zijn om het plaatselijk om te werken tot vloeibaar alcohol, wat eenvoudig verder is te verwerken of te vervoeren.

Zon-PV en wind leveren elektriciteit. Voor de opslag daarvan komen in tabel 6.1.1 alleen waterstof (H), opgepompt water, perslucht en een batterijsysteem in aanmerking. Voor perslucht en batterijen heeft men grote volumina nodig met een groot ruimtebeslag, dus dan lijkt waterstof, ondanks de nog hoge kosten en hoge verliezen een interessante optie.

Van opgepompt water heeft men ook grote volumina nodig, maar die zijn wel beschikbaar in bergachtige gebieden. Ter wille van een eindafweging tussen waterstof en

²³⁷ Stroomversnelling, a.w., p 115

²³⁸ Stroomversnelling, a.w., Figuur 4.5.9 op pag 280 en tabel 4.5.2 op pag 283 geeft een overzicht van de verwachtingen

²³⁹ 0.223 PJ€/300 000 L

²⁴⁰ Dennis Anderson and Matthew Leach, Harvesting and redistributing renewable energy: on the role of gas and electricity grids to overcome intermittency through the generation and storage of hydrogen, *Energy Policy* 32 (2004) 1603-1614

²⁴¹ Ulf Bossel, Hydrogen, *Renewable Energy World*, March-April 2004, 155-159 komt in een analyse van alle kosten, en de huidige elektrolyse-efficiency tot een veel lager getal van 25 %

opgepompt water, desnoods in de Karpaten of de Kaukasus, moeten de kosten van transport van elektriciteit worden meegenomen.

Tabel 6.1.1. Energie inhoud van diverse opslagmedia voor energie in miljoen J per liter

brandstof	druk	energie-inhoud/ (MJ/L)
benzine	1 atmosfeer = 1 bar	33.5
alcohol (ethanol)	1 bar vloeibaar	21.2
H gas	200 bar	2.5
H gas	800 bar	10.2
H vloeibaar	14 bar bij – 240 °C	10.0
water 100 meter hoog		0.001
perslucht	200 bar	0.0065
biomassa droog ²⁴²		≈ 9
loodaccu		0.3

Transport van elektriciteit

Het verlies P_{lost} aan elektrisch vermogen bij geleiding door een draad met elektrische weerstand R en spanning V , terwijl bij de afnemer $P_{transmitted}$ wordt afgeleverd bedraagt²⁴³

$$\frac{P_{lost}}{P_{transmitted}} = \frac{R}{V^2} P_{transmitted} \quad (6.1.1)$$

Om het relatieve verlies aan de linkerkant van de vergelijking zo klein mogelijk te maken, moet aan de rechterkant de verhouding R/V^2 zo klein mogelijk worden. Het afgenomen vermogen ligt immers vast door de vraag. In de praktijk vervoert men elektriciteit in de vorm van wisselstroom over grote afstanden met hoogspanningskabels, in Nederland tot 380 kV.

elektriciteitstransport via gelijkstroom (DC)

Bij elektriciteitstransport over grote afstanden wordt dikwijls gebruik gemaakt van gelijkstroom (DC). Dat kan bij dezelfde spanning V , de verliezen terug brengen tot 74 %.

Er zijn ontwerpen in omloop waarbij de spanning in de gelijkstroomkabels wordt opgevoerd tot 800 kV (HVDC=High Voltage DC). Vanwege het kwadraat in de formule lopen de verliezen in de kabels dan nog verder terug, tot 17 % van de verliezen in de traditionele hoogspanningsleidingen. In de praktijk zal men de bestaande hoogspanningsnetten binnen en tussen de Europese landen handhaven op 380 kV, maar tussen bepaalde knooppuntende HVDC kabels aanbrengen²⁴⁴. Een voorbeeld is het HVDC hoogspanningsnet van Noorwegen naar NL. Daarvoor bedragen de kosten

²⁴² Wolf hanteert 18 MJ/kg. De biomassa zal echter niet compact kunnen zijn, vandaar een factor 2. Als men de biomassa omzet in bijvoorbeeld ethanol wordt de energiedichtheid hoger en is vervoer via pijpleidingen handiger.

²⁴³ Dit zijn alleen de Ohmse verliezen, in de kabels. Verliezen in omvormers e.d. komen daar nog bij.

²⁴⁴ Stroomversnelling, a.w. Fig 6.1.2 verbindt zo Europa met Azië en Afrika.

450 miljoen € voor een transportkabel met een capaciteit van 600 MW, over een afstand van ca. 500 km; dat transport kost dus 750 €/kW²⁴⁵.

Er komt dan een veelstapsproces: gelijkstroom uit zon-PV of wind wordt eerst omgezet in wisselstroom, dan omhoog getransformeerd tot 380 kV, even verderop tot 800 kV, dan gelijkgericht tot 800 kV DC en bij de afnemer in omgekeerde volgorde tot 220 V wisselstroom. Er zijn dus diverse omvormers nodig wat ook de nodige kosten met zich meebrengt. Schattingen geven aan dat voor een transport over 1000 km met HVDC de kosten 1 €/kWh zullen bedragen²⁴⁶. Opslag van elektriciteit uit wind en zon-PV op 2000 km afstand in opgepompt water zal de prijs van elektriciteit verhogen met meer dan 4 €/kWh²⁴⁷.

Conclusie

Er is op dit moment nog geen grootschalig opslagmedium voor elektrische energie operationeel. Totdat dit het geval is zal bij gebruik van zon-PV en wind voor elektriciteitsopwekking reservecapaciteit in de vorm van gasgestookte centrales beschikbaar moeten zijn.

Voor grootschalige elektriciteitsopslag komen opgepompt water en waterstof door elektrolyse in aanmerking. Voor opgepompt water is de capaciteit in EU15 beperkt, en is een grootschalig internationaal koppelnet een vereiste. Waterstof kan worden geproduceerd ter plaatse waar de zon-PV en wind installaties staan opgesteld en kan daarmee een decentraal, stabiel systeem van elektriciteitsvoorziening ondersteunen.

Schattingen van opbrengsten aan hernieuwbare energie per km²

In de hierna volgende stukjes worden schattingen gemaakt van de opbrengst aan hernieuwbare energie per km², en aangegeven welk beslag aan ruimte en middelen nodig is om een significant deel van de energie in 2050 hernieuwbaar op te wekken. Wij geven numerieke schattingen voor wind op zee, wind op land, voor PV en voor biomassa. Vooral voor wind zal ook op land de energie-opbrengst sterk afhangen van de lokatie: aan de kust waait het sterker dan op zee. De hieronder te geven resultaten zijn daarom ruwe gemiddelden.

Modelmatige uitgangspunten

Voor wind, PV en biomassa schatten wij de opbrengst per km² op basis van bewezen technologie en geven, waar mogelijk, de technologische perspectieven. De resultaten worden samengevat in tabellen 6.1.3 en 6.1.4. Verschillende van onderstaande argumenten is al gegeven in eerdere hoofdstukken. Wij herhalen die hier voor de volledigheid en breiden ze iets uit.

²⁴⁵ Lako, "Kenmerken van gelijkstroom of wisselstroom hoogspanningsnetwerken", ECN-C--03-124, 2004 noemt kosten van 300 – 870 €/kW (zowel over land als over zee).

²⁴⁶ Stroomversnelling, a.w. p. 182

²⁴⁷ De stroom moet heen en terug en het oppompen van water en weer laten terugstromen geeft nog 25% verlies.

Wind op zee:

Als model nemen wij het voorgestelde windpark Egmond. Dat levert jaarlijks 1.2 PJe via 36 turbines van 2.75 MWe op 19 km² zee-oppervlak²⁴⁸. De ashoogte van de turbines zal rond 80 meter zijn (de Amsterdamse Westertoren); zij hebben wieken met een straal van 50 meter. De onderlinge afstand in de windrichting moet 10 tot 20 keer de straal bedragen, want de luchtstroming moet de luwte achter de turbines kunnen aanvullen. Bij Egmond zijn de turbines gepland op 1000 meter afstand in de overheersende ZW windrichting en 650 meter er loodrecht op. Een opbrengst van 1.2 PJe op 19 km² betekent 1 PJe voor 15.8 km² of 0.0633 PJe/km². De effectieve bedrijfstijd (Engels: load factor) wordt geschat op 38 %.²⁴⁹

Een beperking is dat schepen niet dicht in de buurt mogen komen uit vrees voor aanvaring. De windparken moeten dus royaal buiten scheepsroutes worden gepland en visvangst en pleziervaart zijn uitgesloten.

Wind op land

Er is minder windsterkte op land dan op zee en ook de bedrijfstijd op land is korter dan op zee, maar voor hoge turbines zal het verschil met zee wel meevallen. Wij postuleren voor land 2/3 van de energie-opbrengst op zee: 0.8 PJe op 19 km² of een jaarproductie van 1 PJe vraagt 23.8 km² of 0.042 PJe/km². Daarbij moet opnieuw worden opgemerkt, dat het in Europa aan de kusten veel meer waait dan in het binnenland. De hier gegeven schattingen gelden ruwweg voor de eerste paar honderd km van de kusten met op 50 meter hoogte windsnelheden van minstens 5.5 m/s²⁵⁰.

Wind op het dak

In Nederland varieert de windsnelheid op 50 meter hoogte van 5 m/sec in het binnenland tot 7.5 m/sec aan de kust²⁵¹. Een windmolen op een dak zal niet al te groot kunnen zijn, vanwege de krachten die de molen moet opvangen. Neem een straal van 1 meter voor de wieken en een windsnelheid van 4 m/sec (omdat de huizen lager zullen zijn dan 50 m) dan volgt een vermogen van 190 W²⁵². Dat wordt slechts een deel van de tijd geleverd en moet worden opgeslagen, bijvoorbeeld in batterijen²⁵³.

Het gemiddeld geleverde vermogen van dit molentje is op zijn best 100 W. In 2001 was het elektriciteitsverbruik per woning gemiddeld een kleine 400 W²⁵⁴. Dat betekent dat in gunstige gevallen, bij eengezinswoningen en goede windvang, een molen op het dak een bijdrage kan leveren aan het huishoudelijk gebruik. Aangezien dat slechts in een beperkt aantal gevallen mogelijk is en het huishoudelijk gebruik slechts 20 % is van het totale verbruik leveren molens op het dak geen finale oplossing²⁵⁵.

²⁴⁸ Stromen, 3 Oktober 2003, pag 4

²⁴⁹ Als de turbines 100 % van de tijd het volle vermogen zouden leveren, zouden ze 3.12 PJe produceren.

²⁵⁰ Figuur 3.4.2 in Stroomversnelling, a.w., pag 165

²⁵¹ Stroomversnelling, a.w., pag 165

²⁵² Wij hebben 80 % genomen van de Betz limiet.

²⁵³ Een andere optie is een deel van de elektriciteit te gebruiken om via een warmtepomp de woning te verwarmen. Omdat een woning slechts langzaam opwarmt en afkoelt is de fluctuatie van de wind als warmtebron minder ernstig.

²⁵⁴ CBS, Statistisch Jaarboek 2003, pag 312: gebruik huishoudens 22100 miljoen kWh, en pag 184: 6.5 miljoen woningen.

²⁵⁵ In Schotland worden molens op het dak verkocht met een opgegeven piekvermogen van 750 W. Zie: New Scientist, 14 Februari 2004, 24.

Efficiency verbetering van windparken

Men kan laten zien²⁵⁶ dat voor een rechthoekig windpark de opbrengst per km² op een bepaalde hoogte gebonden is aan een maximum. Dat maximum neemt toe met de hoogte waarop de turbines in de wind staan. Dat is toe te schrijven aan de hogere windsnelheid op grotere hoogte. De windsnelheid neemt sterk toe van 10 tot 100 meter hoogte en blijft daarna wel toenemen, maar veel minder sterk. De constructie- en onderhoudskosten blijven echter sterk toenemen met de hoogte, dus wij verwachten een optimum in de buurt van een hoogte van 100 meter hoogte. Wat dat betreft geeft een Egmond park een goede indicatie van de mogelijkheden.

Het Egmond park op zee zal, naar verwachting, 38 % van zijn tijd energie leveren. Dat is toe te schrijven aan het feit dat alleen tussen bepaalde windsnelheden vermogen wordt geleverd (zie fig. 3.1.4). Op land is dit percentage lager. Het is denkbaar dat de bedrijfstijd verlengd kan worden, wat nog een verbetering van 20 tot 30 % zou kunnen opleveren.

In figuur 3.1.4 ziet men dat vanaf een windsnelheid van, in dat geval, 12 m/s de opbrengst horizontaal begint te lopen. Dat is karakteristiek voor alle huidige types windturbines. Bij die snelheid, in de figuur aangegeven als v_{rated} , is de opbrengst dichtbij het theoretische maximum²⁵⁷, op het oog zo'n 80% van die waarde. Bij hogere windsnelheden blijft de opbrengst constant en daarmee wordt de opbrengst een steeds kleiner deel van het theoretisch maximum.

Het is denkbaar dat men ook bij de hogere windsnelheden, die minder voorkomen (figuur 3.1.4 (b)), opbrengsten dichtbij het maximum kan bereiken. De 2 vrijheidsgraden die er nog zijn: hoogte van de turbine en de gerealiseerde fractie van theoretisch maximum, zullen wellicht een 50 % extra opbrengst kunnen geven. Samen met de verlenging van de effectieve bedrijfstijd komt men op een verdubbeling als theoretische bovengrens, dus 0.13 PJe per km² per jaar op zee of 0.09 PJe per km² per jaar op land. In de praktijk zal dat – zelfs in 2050 - niet meer worden dan 50 % hogere opbrengst. Dat wordt 0.10 PJe per km² per jaar op zee of 0.07 PJe per km² per jaar op land²⁵⁸. In een recent proefschrift²⁵⁹ wordt een geïnstalleerd vermogen van 8 MW/km² op land haalbaar geacht. Bij een bedrijfstijd van 24 % geeft dat 0.06 PJe/ km², iets kleiner dan het getal van tabel 6.1.4.

Het is onwaarschijnlijk dat verdere technologische vooruitgang de opbrengst per km² in Nederland verder kan verhogen dan de hier aangegeven 50 %. Eerder zullen de kosten per kWhe kunnen dalen.

Als men de windsnelheden in Nederland vergelijkt met die van andere gebieden, dan bevindt ons land zich in een gunstige middenpositie²⁶⁰. Wij zijn dus niet pessimistisch als we in tabellen 6.1.3 en 6.1.4 de opbrengst van windparken in de EU-15 of op wereldniveau gemiddeld gelijk stellen aan die in Nederland.

²⁵⁶ EB-2004-papers and calculations-energie opbrengst van een windpark; op aanvraag beschikbaar

²⁵⁷ Dat maximum heet de Betz limiet. Die wordt bepaald door de wetten van behoud van massa en van energie. Daaraan is niet te ontkomen.

²⁵⁸ Dat is equivalent met 28 GWh/km² per jaar op zee of 20 GWh/km² per jaar op land

²⁵⁹ Monique Hoogwijk, UU 2004, geciteerd in Stroom, 26 maart 2004, pag 3

²⁶⁰ Stroomversnelling, a.w. pag 165, gebaseerd op gegevens van Riso, Denemarken voor 50 meter hoogte.

PV (Si basis)

De efficiency van photovoltaïsche cellen op Si basis voor de productie van elektriciteit ligt in de orde van 20 % per cel; aansluitingen, bevestiging en massaproductie veroorzaken verliezen, vandaar dat we uitgaan van bestaande gegevens voor totale installaties, beschreven in hoofdstuk 3.3. Voor Nederland/Noord-Duitsland nemen wij een waarde tussen die voor de diergaarde Blijdorp in Rotterdam (58.2 kWhe/(m² jaar)) en Amsterdamse woningbouw (75 kWhe/(m² jaar))²⁶¹, zeg 70 kWhe/(m² jaar) = 0.252 x GJe/(m² jaar)²⁶².

Bij de evenaar²⁶³ is de lichtinval boven in de atmosfeer gemiddeld over het jaar $8/5=1.6$ keer zo groot. De zonne-instraling op aarde hangt niet alleen af van de geografische breedte maar ook van de gemiddelde bewolking. Die is in(sub) tropische gebieden kleiner dan in Nederland. Bronnen²⁶⁴ geven voor Noord-Spanje een instraling die een factor 1.5 keer zo groot is als in Nederland, en in Zuid-Spanje 1.8 keer zo groot is en voor Centraal-Algerije zelfs een factor 2.1 keer zo groot is als in Nederland.

De gemiddelde PV opbrengst over EU-15 schatten wij daarom op 0.30 GJe/(m² jaar) en voor de bewoonde wereld nog iets hoger, zeg 0.35 GJe/(m² jaar).

zon op het dak

Een zonnepaneel op het dak is niet onderhevig aan windkracht en technisch daarom eenvoudiger te installeren dan een windturbine. Bij een goede ligging op het Zuiden zal per m² zonnepaneel een opbrengst van 75 kWh per jaar worden bereikt²⁶⁵. Voor nieuwbouwwoningen met een optimale ligging en een zonnepaneel van 15 m² wordt de jaaropbrengst 1125 kWh. Hoewel de zon slechts een deel van de dag schijnt kan men fictief delen door het aantal uren per jaar en vindt een 'continu' opbrengst van 128 W. Dat is dus beter dan de eerder besproken windmolen op het dak.

Door een groep op het ECN is in 1998 uitgerekend²⁶⁶, dat als men vanaf dat moment alle nieuwe eengezinswoningen zou uitrusten met een zonnepaneel van 15 m², en nieuwe meergezinswoningen met panelen van 5 m² per gezin dat 1313 GWh per jaar zou opleveren, of 4.73 PJe per jaar. Dit is overigens alleen realiseerbaar als in de bouwvoorschriften van nieuwbouwwoningen deze eis wordt meegenomen, en als ze gunstig op de zon worden gebouwd. Van de bestaande woningen ligt globaal 25 % op het Zuiden. Dezelfde groep neemt aan, dat voor de bestaande, Zuidelijk gerichte eengezinswoningen 1 % van de eigenaren bereid is 5 m² aan zonnepanelen te plaatsen en van de geschikte, bestaande meergezinswoningen 5 %. Dat levert dan nog eens 71 GWh of 0.26 PJe op. Aangezien het totale elektriciteitsverbruik in de nederlandse

²⁶¹ Blijdorp ontleend aan gegevens van de gemeente Rotterdam; Amsterdamse woningbouwproject De Dageraad, zie Stroomversnelling, 17 Oktober 2003, pag 1:

²⁶² Dit is in goede overeenstemming met een schatting uit Stroomversnelling, a.w., p. 106. Daar leveren 18.2 km² PV in Nederland een jaaropbrengst van 4.85 PJe → 0.27 GJe/m².

²⁶³ Egbert Boeker en Rienk Van Grondelle, Environmental Science, Physical Principles and Applications, Wiley 2001, p 154.

²⁶⁴ Stroomversnelling, a.w. pag 181

²⁶⁵ Gegevens voor dit stukje ontleend aan Stroomversnelling, a.w., pag 106, waar berekeningen van ECN worden geciteerd.

²⁶⁶ Stroomversnelling, a.w. pag 106, waarin de resultaten van de groep worden besproken.

huishoudens in 2001 rond 80 PJe bedroeg²⁶⁷, is het zinvol verder te gaan met PV op het dak.

Bij grootschalige toepassing van PV op het dak zou een opslagsysteem nodig kunnen zijn. Dat kan eventueel per woning of wijk worden gebouwd.

Er zijn hogere schattingen van wat mogelijk is op de daken van woningen. Een rapport van KPMG voor Greenpeace²⁶⁸ maakt een schatting van het aantal km² dakoppervlak in Nederland en komt voor alle woningen²⁶⁹ (oud+nieuw, ongeacht orientatie) tot een maximale opbrengst van 14121 GWh per jaar, ruim een factor 10 hoger dan de ECN studie²⁷⁰. Als men met de gegevens van de ECN studie aanneemt dat niet slechts 1 tot 5 % maar alle eigenaren van de bestaande, Zuidelijke bouw 5 m² zonnepanelen aanleggen, komt men op 2333 GWh per jaar in plaats van 1313 GWh per jaar. Dat verschilt nog een factor 5 met KPMG/Greenpeace. Dat moet o.i. worden toegeschreven aan het feit dat bij KPMG ook minder gunstig gelegen daken worden benut en dat per woning meer dan 5 m² aan panelen wordt geplaatst. En dan moet men ook nog aannemen, dat alle woningen, ook de huurwoningen, van PV worden voorzien.

Een volledige benutting van het dakoppervlak van de woningen is alleen mogelijk als de overheid dat afdwingt en als de prijzen dat toelaten. Het Greenpeace rapport gaat uit van een grote fabriek die jaarlijks 500 MW²⁷¹ aan piekvermogen produceert, waar men als het ware een sprong maakt in de leercurve van figuren 1.13 en 3.3.2. Dat zou een prijs opleveren van 14 à 15 €ct per kWh. Dat is dezelfde prijs die kleinverbruikers thans betalen, zonder belastingen en heffingen en een stuk lager dan de 20 €ct per kWh inclusief milieuheffing die wij thans betalen, maar de kosten van opslag moeten nog bij de Greenpeaceprijs worden opgeteld. Voor het bedrijfsleven dat via grootcontracten werkt met prijzen in de buurt van 4 of 5 €ct/kWh is de prijs nog steeds niet aantrekkelijk.

Het bovenstaande geeft wel het dilemma aan. Zonder overheidsstimulering van PV zal er weinig gebeuren vanwege de hoge prijs. Met zachte dwang, via bouwvoorschriften voor nieuwbouw, is meer mogelijk maar is de markt zo dun dat prijsverlaging heel langzaam zal gaan. Met sterke dwang 'Iedereen moet zijn maximale dakoppervlak benutten met PV' zal de prijs sterker dalen maar vanwege de opslag wordt de kWh-prijs niet echt goedkoop. Het technisch potentieel van PV is wel hoog maar het economisch potentieel nog niet. De schrijver van dit hoofdstuk meent, dat 'zachte dwang' politiek en maatschappelijk het meest haalbare is – en de overheid zou die zachte dwang ook moeten uitoefenen.

²⁶⁷ Statistisch Jaarboek 2003, pag 307. De daar gebruikte PJ zijn PJe.

²⁶⁸ M.Langman en M. van der Sman, KPMG Bureau voor Economische Argumentatie, "Zonne-energie: van eeuwige belofte tot concurrerend alternatief", Juli 1999

²⁶⁹ De Greenpeace studie maakt ook een schatting voor daken van bedrijven en kantoren. Dat komt uit op ongeveer een kwart van de daken van woningen.

²⁷⁰ Er is nog een studie van Corten, zie Stroomversnelling, a.w., pag. 168 die 95000 GWh per jaar in Nederland mogelijk acht, waarvan op schuine daken in Zuidelijke richtingen 8000 GWh per jaar.

²⁷¹ De hierboven genoemde 14121 GWh per jaar correspondeert met 17700 MW piekvermogen. De fabriek zou dus alleen al voor woningen 35 jaar werk hebben.

efficiency verbetering

Voor Nederland wordt de jaarlijkse instraling op grondniveau geschat op 1000 kWh/(m² jaar). Hieruit volgt, dat de huidige grootschalige opbrengst van 70 kWh/(m² jaar) correspondeert met een efficiency van de zonnecellen + installatie van 7 %²⁷².

Men mag aannemen dat verbeteringen aan de produktiemethoden nog een factor 2 of 3 winst kunnen opleveren. Er zijn studies die voor 2010 onder optimale condities in Nederland een opbrengst van zon-PV schatten van 150 kWh/(m² jaar)²⁷³, ruwweg een verdubbeling van ons getal. Voor 2050 lijkt ons voor het totale systeem het maximaal haalbare het drievoudige van de getallen uit 2004. Het praktisch haalbare schatten wij 2.5 keer zo hoog in.

Toekomsttechnologie op basis van organische materialen zal eerder de kosten verlagen dan de totale efficiency nog verder vergroten²⁷⁴.

Biomassa

Een groep experts van de landbouwkundige universiteit en research centra in Wageningen²⁷⁵ maakt onderscheid tussen biomassa met bemesting en irrigatie (HEI) en biomassa gekweekt met biologische methoden (LEI). In beide gevallen gaat men uit van de hoogproductieve Nederlandse managementstijl. Biomassa voor energie productie zal, naar wij aannemen, uit kostenoverwegingen plaats vinden zonder energie-intensieve bemesting²⁷⁶ en irrigatie, dus LEI. Dat levert 4000 kg droge biomassa per ha per jaar²⁷⁷. Wolf gebruikt een gemiddelde energie inhoud van 18 MJ per kg droge biomassa²⁷⁸, hetgeen voor LEI resulteert in 72 GJ/(ha jaar) = 0.0072 GJ/(m² jaar)²⁷⁹. In een iets oudere studie geeft Novem²⁸⁰ hogere waarden, die spreiden tussen 140 GJ/(ha jaar) en 200 GJ/(ha jaar).

Bij de inzet van biomassa op grote schaal zal men biologische bemesting toepassen en hoewel op bepaalde plaatsen hogere opbrengsten kunnen worden verkregen, zullen wij als gemiddelde waarde de schattingen uit Wageningen aanhouden.

NB. Hoewel de opbrengsten aan biomassa in tabel 6.1.2 aanzienlijk lager zijn dan voor PV, is het grote voordeel van biomassa dat energie-opslag niet nodig is. Het nadeel van biomassa is dat het pas bruikbaar wordt na verwerking, dus vergassing of verbranding. Tabel 3.5.2 geeft voor de efficiency van deze conversie uiteenlopende waarden. Om de gedachten te bepalen schatten wij in beide gevallen de conversie-efficiency rond 50 %.

²⁷² Stroomversnelling, a.w. pag 181. Hoofdstuk 3.3 uit dit rapport geeft een lagere instraling van 800 kWh/m². Om in het huidige hoofdstuk consistent te zijn hanteren wij de waarden van 'Stroomversnelling'.

²⁷³ Corten, geciteerd in Stroomversnelling, a.w., p.168

²⁷⁴ De organische zonnecellen die momenteel op laboratoriumschaal worden beproefd hebben een efficiency van 2 à 3 %.

²⁷⁵ Wolf et al, Agricultural Systems 76 (2003) 841-861

²⁷⁶ De benodigde stikstof voor de plantengroei wordt bijvoorbeeld geleverd door –te kweken- klavers. Bron: briefje van Wolf.

²⁷⁷ Wolf, pag 846

²⁷⁸ Wolf, 852

²⁷⁹ Zie ook: Biomassa: tanken of stoken? Een vergelijking van de inzet van biomassa in transportbrandstoffen of elektriciteitscentrales tot 2010, CE Delft, 2003. Deze studie (pag 1) komt voor biodiesel op basis van nederlands koolzaad tot 0.004 a 0.007 GJ/m² en voor bio-ethanol op basis van suikerbieten tot 0.012 a 0.013 GJ/m². In beide gevallen wordt bemesting toegepast. De cijfers in onze hoofdtekst hebben betrekking op onverwerkte biomassa en zijn daarmee van de goede grootte orde.

²⁸⁰ Novem, 2EWAB 00.27, Utrecht 2000, pag 6

efficiency verbetering

Voor Nederland is de opbrengst van biomassa 0.2 % van de invallende zonne-energie op de grond. Het is denkbaar dat door het kweken van speciale gewassen, aangepast aan klimatologische omstandigheden, wellicht met behulp van GM methoden de opbrengst van biomassa groter wordt. Misschien is hier, evenals bij PV, een factor 2 of 3 te winnen. De relatieve voorsprong van PV ten opzichte van biomassa, die blijkt uit tabel 6.1.2 zal wel behouden blijven. Voor 2050 nemen wij een extra factor 2.5 aan ²⁸¹.

opbrengst van biomassa

Hierboven gaven wij een schatting van de opbrengst aan biomassa per km². De hoeveelheid die in werkelijkheid geproduceerd kan worden is sterk afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare grond. En die is weer afhankelijk van de hoeveelheid landbouwgrond die gebruikt wordt voor de voedselproductie. De voedselproductie hangt af van de omvang van de wereldbevolking en van het dieet. Bij een vegetarisch dieet wordt het plantaardig voedsel direct genuttigd. Bij een vleesrijk dieet wordt plantaardig voedsel aan dieren toegediend, die dan worden vet gemest en vervolgens opgegeten. Per kg vlees moet, afhankelijk van het soort vlees, een veelvoud aan kg plantaardig voedsel worden verbouwd.

Er zijn dus te veel veranderlijken om een eenduidig oordeel te kunnen geven over de beschikbare biomassa voor energieproductie of voor de chemie. Vandaar dat in tabel 3.5.1 uit verschillende studies een grote spreiding aan getallen voorkomt. Wij geven in tabel 6.1.2 enkele getallen²⁸², uitgaande van een gemiddelde bevolkingsaanwas, die in 2050 resulteert in een bevolking van 9,37 miljard mensen. De biomassa voor energie en chemie wordt 'biologisch' geproduceerd, dus met natuurlijke meststoffen, het voedsel voor mens en dier met intensieve landbouw.

In tabel 6.1.2 worden de resultaten samengevat voor een vegetarisch, gematigd en vleesrijk dieet voor de hele wereldbevolking. Ook wordt nog aangegeven wat het resultaat zou zijn bij het huidige beschikbare landbouwareaal en het totaal denkbare in cultuur te brengen landbouwareaal. Dat laatste is in tabel 6.1.2 aangegeven als 'max'. De spreiding in tabel 6.1.2 is even groot als die in tabel 3.5.1 – alleen wordt nu de oorsprong van de spreiding helder.

Ter vergelijking kan dienen dat het totale primaire energieverbruik (dat is het verbruik vóór conversie in benzine, elektriciteit e.d.) 420 EJ bedroeg, waarvan 44 EJ biomassa²⁸³. In theorie zou het huidige wereldenergieverbruik geheel gedekt kunnen worden door een maximale uitbreiding van het landbouwareaal en een menu met gematigd vleesgebruik voor iedereen.

²⁸¹ Dit getal komt voor rekening van de auteur. Het is geïnspireerd op discussies met biofysici, die aangeven dat de fotosynthese thans niet optimaal is. Milieu-stress kan de opbrengst verminderen met 70 %. Ook stopt de fotosynthese bij fel zonlicht. Er is dus ruimte voor verbetering.

²⁸² De hier volgende gegevens zijn ontleend aan Wolf a.w. Bij de omrekening van kg biomassa naar energie-inhoud is het getal gebruikt van deze auteurs, 18 MJ/kg droge biomassa.

²⁸³ Renewables Info, a.w., pag 3.

Tabel 6.1.2 Opbrengst aan biomassa voor energie en chemie bij matige bevolkingsgroei tot 2050 bij diverse diëten en huidig of maximaal beschikbaar landbouwareaal. Voor de opbrengst aan biomassa per km² is de waarde van 2004 genomen.²⁸⁴

dieet	areaal	biomassa/10 ¹² kg droog	EJ
vegetarisch	huidig	15.92	287
	max	27.28	491
gematigd	huidig	12.72	228
	max	24.04	432
vleesrijk	huidig	7.40	133
	max	18.68	336

Aan de andere kant zijn er diverse combinaties van variabelen die helemaal geen biomassa overlaten voor energieteelt en voor de chemie: een vleesrijk menu, biologisch geteeld voor mens en dier laat zelfs bij een lage bevolkingsgroei geen ruimte over voor energie of chemie op basis van biomassa.

Samenvatting

De gegevens uit de voorafgaande paragrafen worden samengevat in tabel 6.1.3 op grond van de bestaande technologie. In tabel 6.1.4 geven wij een taxatie van de technologische mogelijkheden voor 2050. Voor windenergie achten wij die tamelijk 'hard'. Voor PV en biomassa zouden de gerealiseerde opbrengsten in 2050 wel eens lager kunnen zijn.

Tabel 6.1. 3. Gerealiseerde jaaropbrengsten aan hernieuwbare energie 2004; voor wind op land op gunstige plaatsen

2004	wind op zee PJe/km ² =GJe/m ²	wind op land PJe/km ² =GJe/m ²	PV PJe/km ² =GJe/m ²	Biomassa PJ/km ² =GJ/m ²
Nederland	0.0633	0.042	0.252	0.0072
EU-15	0.0633	0.042	0.30	0.0072
Wereld	0.0633	0.042	0.35	0.0072

Tabel 6.1. 4. Optimistische schatting van jaaropbrengsten hernieuwbare energie 2050; voor wind op land tot een paar honderd km landinwaarts uit de kust

2050	wind op zee PJe/km ² =GJe/m ²	wind op land PJe/km ² =GJe/m ²	PV PJe/km ² =GJe/m ²	Biomassa PJ/km ² =GJ/m ²
Nederland	0.10	0.07	0.63	0.018
EU-15	0.10	0.07	0.75	0.018
Wereld	0.10	0.07	0.88	0.018

²⁸⁴ Gegevens ontleend aan Wolf, a.w.

Energie-opties voor EU-15 en NL in 2050 en 2100

Wij volgen – om de gedachten te bepalen – de gedachtengang, geschetst in hoofdstuk 1, en gepresenteerd op het mini-symposium in de marge van het PvdA congres, Groningen, december 2003. De dreiging van klimaatverandering, gecombineerd met uitputting van goedkope fossiele energiedragers zal (moeten) leiden tot een sterke reductie van fossiele energiedragers in de ontwikkelde landen, waardoor de ontwikkelingslanden wat langer de kans krijgen met fossiele energiedragers hun industrialisatie op te bouwen.

primair energieverbruik - definities

Het is noodzakelijk het begrip '*primaire energie*' toe te lichten. Het grootste deel van het huidige energieverbruik bestaat uit de energie-inhoud van fossiele brandstoffen zoals ze uit de grond komen. Die brandstoffen kunnen in raffinaderijen worden omgezet in benzine, kerosine en allerlei andere stoffen. Ze kunnen ook in elektriciteitscentrales worden omgezet in stroom. In alle gevallen gaat primaire energie verloren, meestal in de vorm van warmte in het milieu.

Naast fossiele brandstoffen leveren ook waterkracht en kernsplijting een bijdrage aan de energievoorziening in de vorm van elektriciteit. Dat zijn dus elektrische Joules. De vraag is hoe die omgerekend moeten worden naar primaire energie. Als men kijkt naar de 'Key Statistics' van de International Energy Agency (IEA) dan vindt men dat in 2001 de opbrengst van waterkracht en kernsplijting praktisch²⁸⁵ even groot waren op 9.55 EJe. De bijdrage aan primaire energie voor kernsplijting wordt echter geschat op 6.9 % van het wereldenergieverbruik en voor waterkracht op 2.2 %²⁸⁶.

De reden van dit verschil is dat traditioneel het nucleaire aandeel met 3 wordt vermenigvuldigd. Het argument is dat er gemiddeld 3 Joules aan steenkool nodig zijn om 1 elektrische Joule te produceren. Men kan dus zeggen dat 1 nucleaire Je 3 fossiele Joules uitspaart. Voor waterkracht volgt de IEA deze redenering niet.

De Amerikaanse statistieken²⁸⁷ vermenigvuldigen zowel hydro-elektriciteit als waterkracht met een factor 3 om aan hun bijdrage tot de wereldenergievoorziening te komen. Dat is beter aanvaardbaar, maar de factor 3 is sterk afhankelijk van de efficiency van de gemiddelde fossiele elektriciteitscentrale. Als die groter wordt, dan wordt het aantal door hydro en nucleair uitgespaarde fossiele Joules kleiner.

Het gaat in onze hieronder volgende analyse om de levensstandaard van de bevolking. Als de productie per fossiele Joule kan verdubbelen door een verdubbeling van de efficiency, dan kan het aantal fossiele Joules worden gehalveerd en zal toch iedereen tevreden zijn. Omdat de trend is relatief meer gebruik van elektriciteit te maken, maakt de oorsprong van die elektriciteit (fossiel of hernieuwbaar bijvoorbeeld) voor de levensstandaard van de consument geen verschil. Wij zullen daarom uitgaan van de rekenmethode van de Amerikaanse International Energy Annual, dus met de factor 3 voor hydro en nucleair. En wij zullen toekomstige efficiency-verhoging bij de omzetting

²⁸⁵ Key Statistics, International Energy Agency (2003). Op pag 16 vindt men op wereldschaal 2653 TWh nucleair en op pag 18 vindt men 2646 TWh aan waterkracht. Deze getallen zijn omgerekend naar EJe.

²⁸⁶ Key Statistics, a.w. pag 6

²⁸⁷ International Energy Annual 2001: www.eia.doe.gov/iea, tabellen 2.1 en 2.9

van fossiel naar elektra meetellen als fictief energieverbruik, tussen haakjes, waarbij meteen wordt aangegeven dat de CO₂ uitstoot eveneens vermindert. Het energieverbruik in onze tabellen, inclusief het fictieve deel geven dus een maat voor de levensstandaard van de bevolking.

Terzijde: het Nederlandse CBS doet dit anders. Het telt de afvalwarmte bij centrales als verbruiksverlies mee in de energiebalans van Nederland en behandelt alle Joules op dezelfde manier. Dit is een betere methode dan in de ouderwetse statistieken, maar deze zullen wij hieronder niet toepassen.

Wij gebruiken dus de ouderwetse methode, omdat de internationale statistieken daarop zijn gebaseerd. Maar we geven wel aan hoe wij de hernieuwbare Joules terugrekenen naar primaire Joules uit de statistieken. Allereerst beschouwen wij biomassa. Biomassa zal moeten worden vergast of andere bewerkingen ondergaan, en het vervoer van biomassa is energie-intensief. Vandaar dat 1 J biomassa door ons als 1 J primaire energie wordt geteld.

Zon-PV en wind leveren rechtstreeks elektriciteit. 1 Je zou daarom als 3 J primair geteld kunnen worden. Echter moet opslagcapaciteit worden georganiseerd (met corresponderende energieverliezen) en moet de elektriciteit over grote afstanden worden vervoerd. Om die verliezen in rekening te brengen gebruiken wij 1.5 J primair energie voor 1 Je. Het is misschien wat aan de pessimistische kant, maar daar staat tegenover dat tabel 6.1.4 aan de optimistische kant is. Waterkracht wordt traditioneel berekend als 1 Je = 3 J primair. Wij zullen dit gebruik handhaven, omdat deze bron flexibel is in zijn inzet.

Wereld in 2050 en 2100

Volgens figuur 1.1 en tabel 1.1 was in het jaar 2000 het totale primaire energieverbruik rond 400 EJ, waarvan 320 EJ fossiel en 80 EJ waterkracht, kernsplijting en traditionele biomassa. In 2050 wordt in figuur 1.3 het totale verbruik voorspeld op 850 EJ. Om als wereld de CO₂ concentratie in de atmosfeer te stabiliseren op 550 ppm, mag volgens figuur 1.12 de hoeveelheid fossiele primaire energie *bij de huidige uitstoot per fossiele Joule* in 2050 uitkomen op 450 EJ, zodat de 'andere bronnen' 400 EJ per jaar moeten leveren. In de periode van 2050 tot 2100 moet volgens figuur 1.12 de hoeveelheid fossiele energie *bij de huidige uitstoot per fossiele Joule* afnemen tot 200 EJ per jaar, en moet de productie van de 'andere bronnen' navenant stijgen. De cursivering hierboven geeft aan dat het gaat om de uitstoot van CO₂ en niet om beperking van fossiele Joules per se.

Uit tabel 6.1.2 volgt dat zelfs biomassa in staat is om 450 EJ per jaar aan primaire energie te leveren, mits het dieet matig blijft in vlees en de bevolkingsgroei niet al te groot is. Het dieet van de bevolking behoort dus een punt van politieke aandacht te zijn. Nagegaan moet worden op welke manier, via heffingen en belastingen, het dieet kan worden beïnvloed.

EU-15 in 2050 en 2100

Ter wille van de eenvoud, en vanwege de beschikbaarheid van tabellen beperken wij ons hier tot de EU-15 in plaats van de uitgebreide EU-25. Dat is voldoende om na te gaan welke maatregelen nodig zijn. Wij gaan er van uit dat de totale energieconsumptie van

EU-15 het patroon van de 'geïndustrialiseerde landen' volgt uit Figuur 1.1 (a). Dat geprojecteerde energieverbruik is aangegeven in rij 16 van tabel 6.1.5. Figuren 1.4 en 1.5 laten voor West-Europa een wat geringere toename van energieverbruik zien, o.a. doordat een zekere verhoging van de energie-efficiency in de modellen is meegenomen. Wij gaan uit van de wat hogere groei in benodigde energie, om duidelijk te maken dat de materiële welvaart blijft stijgen. Daartoe geven wij, door middel van fictieve Joules, expliciet aan welke bijdrage efficiencyverhoging en energiebesparing leveren.

Het totale energieverbruik neemt dan toe van 68 EJ in 2001 tot 102 EJ in 2050. De CO₂ emissies zouden moeten halveren tot corresponderende met 54 EJ/2 = 27 EJ fossiel uit 2001. De eerste kolommen van tabel 6.1.5 geven de energieconsumptie in 2001 naar bron. Terzijde: de helft van deze primaire energie wordt ook nu al van buiten EU-15 geïmporteerd²⁸⁸.

Het geprojecteerde energieverbruik van 102 EJ in 2050 en 114 EJ in 2100 (rij 16 in tabel 6.1.5) correspondeert met projecties, gebaseerd op economische groei en enige 'natuurlijke' efficiency-verbeteringen, gedicteerd door de markt. Als het zelfde leefpatroon bereikt kan worden met een lager primair energieverbruik zal niemand bezwaar maken. De vraag is of en hoe dat zou kunnen.

Om dit na te gaan onderscheiden wij twee scenario's:

- a) 'alle zeilen bijzetten'. In dit scenario wordt in de EU eensgezind gewerkt aan het installeren van zoveel mogelijk hernieuwbare bronnen van energie: een optimistisch scenario
- b) 'gekissebis'. In dit scenario wordt de uitbreiding van hernieuwbare bronnen van energie verhinderd door planologisch-juridische procedures en maatschappelijke NIMBY acties van mensen die wel hernieuwbare energie willen hebben, maar 'niet in hun achtertuin': een pessimistisch scenario²⁸⁹.

alle zeilen bijzetten

Wij volgen de rijen uit tabel 6.1.5 allereerst voor het 'alle zeilen bijzetten' scenario. In rij 1 wordt het gebruik van zonne-energie voor waterverwarming, beschreven in hoofdstuk 3.2 gesteld op 15 % van het totaal uit rij 16. Deze 15% acht de Europese commissie mogelijk.

In rijen 2 en 3 is aangenomen dat olie en gas in de loop van deze eeuw schaarser en duurder zullen worden en ingezet als grondstof, waardoor in 2100 als enige fossiele energiebron de overvloedig aanwezige steenkool overblijft. Aangenomen wordt dat door

²⁸⁸ International Energy Annual, a.w., table 2.9 geeft de produktiecijfers voor EU-15. Alle bronnen samen leveren 33 EJ.

²⁸⁹ Volgens Van Dale's woordenboek is kissebissen: kleinigheden beredderen, beuzelen, prutsen. En als tweede: heen en weer lopen in huis.

sterkere materialen en slimme technologie, beschreven in hoofdstuk 4.1, een grote efficiency-verhoging optreedt, inbegrepen in rij 5. In die rij worden ook vraagvermindering door technische maatregelen en efficiencyverhoging, zoals beschreven in hoofdstuk 2 ondergebracht²⁹⁰. Met de helft van het fossiele verbruik (27 EJ) bereikt men zodoende dezelfde levensstandaard als met 54 EJ zonder al deze maatregelen. In 2100 moet de CO₂ uitstoot praktisch in zijn geheel worden afgevangen en opgeslagen om te komen tot een totale emissie van 10 % van de waarde van 2001 (Hoofdstuk 4.2).

Tabel 6.1.5 Verbruik aan primaire energie per jaar /EJ in EU15 in 2001²⁹¹, 2050 en 2100

rij	bron	2001	alle zeilen bijzetten			gekissebis		
			2050	2100	noot	2050	2100	noot
1	zon-thermisch(3.2)		15	17	²⁹²	10	11	²⁹³
2	olie	29	10	0		10	0	
3	gas	16	5	0		5	0	
4	steenkool	9	18	27	²⁹⁴	18	27	
5	besparing+efficiency-verhoging fossiel (2.1+2.2 +4.1)		(21)	(27)	²⁹⁵	(21)	(27)	
6	hydro	4	8	8		6	6	
7	nucleair-kernsplijting	9	a	d		h	n	
8	nucleair-kernfusie		0	e		0	p	²⁹⁶
9	wind op land	0.3	4.8	4.8	²⁹⁷	2.4	2.4	
10	wind op zee		2.6	5.2	²⁹⁸	1.3	2.6	
11	biomassa, geteeld		b	f		k	q	
12	PV	0.02	c	g		m	r	
13	geothermisch	0.05	3	6		1.5	3	
14	(bio-) afval	0.6	3	4		1.5	2	
15	gat	0	11.6	15	²⁹⁹	25.3	33	³⁰⁰
16	totaal	68	102	114		102	114	

²⁹⁰ Ook vrijwillige gedragsverandering kan in rij 5 worden begrepen.

²⁹¹ International Energy Annual 2001, a.w., table 1.8 voor olie, gas, steenkool, hydro en nucleair; Renewables Information (2003 Edition), page 75 voor de hernieuwbare bronnen. De bijdragen in Je voor niet-hydro zijn hier nog zo klein dat ze alle zijn vermenigvuldigd met een factor 3 om hun primaire energie te verkrijgen.

²⁹² 15 % van rij 16

²⁹³ 10 % van rij 16

²⁹⁴ CO₂ opslag in 2050 overeenkomstig 6 EJ; in 2100 overeenkomstig 24 EJ

²⁹⁵ Dit zijn fictieve Joules; zij worden door vraagvermindering, efficiency verhoging van conversie en door WKK gecompenseerd

²⁹⁶ In 2100 max kernfusie bijdrage 4.3 EJe (ECN studie van Van Laho en Ybema)

²⁹⁷ EWEA schat voor wind op land (windsnelheden boven 5.5 m/s) technisch maximaal 2 EJe

²⁹⁸ EWEA schat als technisch maximum 11 EJe, maar acht slechts 10% economisch haalbaar

²⁹⁹ (a+b+c) of (d+e+f+g)

³⁰⁰ (h+k+m) of (n+p+q+r)

We nemen verder aan dat de hydrocapaciteit verdubbelt (rij 6). In rij 7 stellen wij kernsplijting op nader te bepalen waarden (a) en (d), omdat het vigerende partijprogramma deze vorm van energie-opwekking wil uitfaseren tot nul. Kernfusie zal in 2050 nog weinig opleveren en is op 0 gesteld, maar kan in 2100, als alles goed gaat, een nog onbekende bijdrage leveren, die is gesteld op (e).

Voor windenergie gebruiken wij de projecties van de windproducenten EWEA, besproken in hoofdstuk 3.1. Op land is het technisch potentieel (windsnelheden boven 5.5 m/s) rond 2 EJe. Omdat de energie elektrisch is geven wij de besproken bonus van 50% en we nemen bovendien aan dat de technologische vooruitgang, besproken bij de overgang van tabel 6.1.3 naar 6.1.4 tegen 2050 wordt gerealiseerd³⁰². Dat geeft 4.8 EJ primair.

De EWEA geeft als technisch potentieel op zee 11 EJe, waarvan op zijn best 10 % praktisch (economisch en planologisch) haalbaar is. Voor 2050 nemen wij dit getal over, met de bonus geeft dat 2.6 EJ primair. Wij nemen voor de tweede 50 jaar een vergroting aan tot 20 % van het technisch potentieel. Die getallen zijn opgenomen in tabel 6.1.5.

Het verbruik aan geteelde biomassa in rij 11 wordt in het midden gelaten als (b) of (f).

Voor zon-PV geeft tabel 3.3.3 in 2100, bij grote kostenreducties, een opbrengst van 4.7 EJe in 2100. Wij laten de opbrengst even open als (c) en (g).

Hoofdstuk 3.6 geeft aan dat met aardwarmte veel meer energie is op te wekken dan thans het geval is: tot 1 EJe. Met de vermenigvuldigingsfactor 3 (dezelfde als bij waterkracht) komt men op 3 EJ primair, het getal voor 2050 in rij 13. Verdere technische vooruitgang en gebruik van warmte bij lagere temperatuur kan dit nog verdubbelen.

Bij afvalverwerking kunnen logistieke verbeteringen (gegarandeerde aanvoer) zorgen voor een verdere benutting van het potentieel (rij 14). Dat alles levert in rij 15 een 'gat' op in de energievoorziening van 11.6 EJ of 15 EJ. Uit tabel 6.1.5 volgt dat dit moet worden opgevuld als volgt:

2050: 11.6 EJ primair → biomassa en/of PV en/of kernsplijting

2100: 15 EJ primair → biomassa en/of PV en/of kernfusie en/of kernsplijting

Een eerste conclusie kan zijn dat door een kleine uitbreiding van kernsplijting (9 EJ in 2001) tot bijna 12 EJ in 2050 en een wat grotere uitbreiding er na, er tot 2100 geen energieprobleem in EU15 hoeft te zijn. Omdat in het huidige partijprogramma kernsplijting geen optie is en kernfusie nog onzeker, gaan we na wat mogelijk is met biomassa of PV alleen.

Het bevolkingsaantal van EU15 is thans 6 % van het wereldtotaal. Een eerste benadering is dat EU15 toch wel 10% van de wereldproductie aan biomassa zou kunnen verbouwen of aankopen (deels zelf verbouwd en deels geïmporteerd, te betalen door export van andere goederen of diensten). Neemt men 10% van de getallen uit tabel 6.1.2 voor een gematigd dieet dan volgt dat ook biomassa alleen het 'gat' in de tabel zou kunnen vullen.

³⁰¹ International Energy Annual, a.w., table 2.9 geeft de productiecijfers voor EU-15. Alle bronnen samen leveren 33 EJ.

³⁰² De vermenigvuldigingsfactor wordt 1.5 (bonus) x 1.6 (technologie) = 2.4

En dan hoeft men nog geen technologieverbetering bij het telen van biomassa in de schatting op te nemen.

Maar het kan ook precieser. In tabel 6.1.6 wordt nagegaan hoeveel land men nodig heeft om het gat (rij 15) te vullen met één van de twee alternatieven biomassa of PV, waarbij in de praktijk natuurlijk een combinatie mogelijk is. We gebruiken zowel de realistische schatting van tabel 6.1.3 als de verwachte technologische verbetering uit tabel 6.1.4. We nemen maar even aan dat tussen 2050 en 2100 daarmee niet veel te winnen is. Ten slotte geven we, zoals besproken, wind en PV een bonus van 50% omdat ze elektrische energie leveren.

Tabel 6.1.6 Ruimtebeslag hernieuwbare energie nodig voor EU-15 met slechts één bron, hetzij biomassa, hetzij zon-PV. Het eerste getal in de tabel is de nodige oppervlakte in de eenheid van 1000 km² en het tweede getal in aantal oppervlakten Nederland³⁰³

2050: 11.6 EJ	conservatief tabel 6.1.3/ 1000 km ² /(NL)		verbeterd tabel 6.1.4/ 1000 km ² /(NL)		2100: 15 EJ	conservatief tabel 6.1.3/ 1000 km ² /(NL)		verbeterd tabel 6.1.4/ 1000 km ² /(NL)	
biomassa	1600	43	650	18		2100	57	830	23
PV op land	39	1	16	0.5		50	1.4	20	0.6

Een blik op de landkaart zal duidelijk maken dat de EU-15 te klein is om een oppervlak van 18 tot 57 keer Nederland voor biomassa-teelt te bestemmen. Toch is in hoofdstuk 3.5 duidelijk geworden dat biomassa veel mogelijkheden biedt voor omzetting naar tal van nuttige chemische stoffen; bovendien slaat de biomassa zijn eigen energie op. Het is dus zaak een goed deel van de benodigde energie uit biomassa te halen en daarvan weer een aanzienlijk deel te importeren. Hiervoor hoeft men niet alleen te denken aan de Rotterdamse haven, maar komt ook de Eemshaven in aanmerking. Deze ligt vlak bij de bestaande hoofd-aardgasinfrastructuur en strategisch ten opzichte van Scandinavië en de Baltische staten.

De cijfers voor PV op land zijn het meest bemoedigend. Het ruimtebeslag is aanvaardbaar, dus het zijn nog slechts de kosten die moeten worden verlaagd. Het is te overwegen om grote oppervlakten in de woestijnen van Centraal Algerije vol te zetten met zonnepanelen en de stroom via HVDC leidingen naar Europa te transporteren. De hogere zonne-instraling in Centraal Algerije zou opwegen tegen de hogere kosten³⁰⁴.

gekissebis

Wij nemen aan dat ook in dit scenario de fossiele brandstoffen verminderen op dezelfde manier als in het eerste, al was het alleen maar vanwege toenemende schaarste. We nemen aan dat de CO₂ doelstellingen in tact blijven. We stellen daarom de hernieuwbare opbrengsten naar beneden bij.

In rij 1 zullen de besparingen tegenvallen, omdat alleen economisch goed renderende oplossingen worden gekozen. Bovendien zal consumentisme de neiging tot besparen

³⁰³ Het totale oppervlak van Nederland is ongeveer 37000 km², waarvan 30000 km² land. Wij nemen het grootste getal aan, omdat dat op de landkaarten een herkenbaar geheel vormt.

³⁰⁴ Stroomversnelling, a.w. pag 178

verminderen. Wij stellen het nu op 10 % van het totaal in rij 16. Hydro in rij 6 stellen wij op 6 EJp, terwijl wij de overige hernieuwbare bronnen halveren.

Dat alles levert in rij 15 een 'gat' op in de energievoorziening van 25.3 EJ (afgerond als 25 EJ) of 33 EJ. Uit tabel 6.1.5 volgt dat dit moet worden opgevuld als volgt:

2050: 25 EJ primair → biomassa en/of PV en/of kernsplijting

2100: 33 EJ primair → biomassa en/of PV en/of kernfusie en/of kernsplijting

Deze gaten zijn een stuk moeilijker op te vullen. Geteelde biomassa zal men toch niet hoger mogen stellen dan 10 % van een redelijk wereldpotentieel, dus op zijn best 20 EJ. Het is bestuurlijk, noch politiek aanvaardbaar nu al te speculeren op efficiencyverbetering bij de biomassateelt. Dat betekent dat men in 2050 niet buiten hetzij kernsplijting kan, bijv op het huidige niveau van 9 EJ, hetzij PV moet inschakelen. Zoals hierboven aangegeven kan, voor redelijke kosten, die PV-opbrengst pas in 2100 een niveau van 4.7 EJe bereiken. In 2050 zal dat nog niet lukken, en in het 'gekissebis' scenario zal men ook niet bereid zijn om meer voor PV te betalen.

In 2100 kan er in het beste geval een fusiebijdrage zijn van 4.3 EJe, of 12 EJ primair. Als men in dit scenario bereid is de nodige investeringen te doen, en kernfusie bewijst zich, dan zou samen met 20 EJ uit biomassa het gat van 33 EJ zijn te vullen.

conclusie

De conclusie moet zijn, dat in het gekissebis scenario kernsplijting nodig blijft, in elk geval totdat kernfusie en/of zon-PV en/of verbetering van biomassateelt haar taak kan overnemen. In beide scenarios zal grote inzet van biomassa nodig zijn.

Nederland in 2050

Alle maatregelen die op het niveau van de EU-15 worden genomen, dienen ook in ons land te worden genomen. Dan nog is het zonder nadere specificaties al duidelijk dat Nederland te dicht bevolkt is om via zon, wind en biomassa in de eigen energiebehoefte te voorzien. In 2001 was het totale primaire energieverbruik 3145 PJ³⁰⁵.

Om een beeld te krijgen van wat er binnen Nederland zonder import mogelijk is geven wij hieronder twee proefparken van 100 km², elk met de huidige mogelijkheden en met gehoopte technologische verbetering in 2050. In Nederland ligt rond 300 km² landbouwgrond braak³⁰⁶, dus enkele proefparken zijn realistisch en haalbaar. Bij die proefparken moet aandacht geschonken worden aan natuurontwikkeling en nieuwe recreatiemogelijkheden.

proefpark-1 (wind + bio + opslag)

Het proefpark heeft een oppervlakte van 100 km². Als dat optimaal wordt ingericht met windturbines op land en biomassa op de grond tussen de windmolens dan levert dat volgens tabel 6.1.3 rond 4.2 PJe wind (elektrisch) en 0.7 PJ biomassa (chemische energie) = 4.9 PJ totaal. Met de hypothetische getallen voor 2050 uit tabel 6.1.4 zou dat

³⁰⁵ Statistisch Jaarboek 2003, CBS, pag 307

³⁰⁶ Statistisch Jaarboek 2003, CBS, pag 278

7 PJ (elektrisch) + 1.8 PJ (chemisch) = 8.8 PJ kunnen worden. Het grote voordeel van dit proefpark is, dat de biomassa kan dienen als energie-opslag maar vooral ook als grondstof voor de chemische industrie als fossiele brandstoffen schaars en dus duur worden.

proefpark-2 (wind + PV + opslag)

Als PV goedkoper wordt is uit energie-oogpunt een betere optie om de 100 km² te gebruiken voor wind op land en PV op de grond. Met tabellen 6.1.3 en 6.1.4 vindt men 4.2 PJ wind en 25.2 PJ aan PV= 29.4 PJ totaal (alles elektrisch). Met de hypothetische getallen voor 2050 zou dat 7 PJ + 63 PJ = 70 PJ, alles elektrisch worden.

Tabel 6.1.7. Opbrengst van proefparken van 100 km² in PJ/jaar

proefpark	jaar	karakter	wind	zonPV	biomassa
1	2004	wind + bio	16.8		2.9
1	2050	wind + bio	28		7.2
2	2004	wind + PV	16.8	101	
2	2050	wind + PV	28	252	
			PJe	PJe	PJ chemisch

Deze opbrengsten zijn niet voldoende om zonder importen aan de Nederlandse vraag naar energie en chemische grondstoffen te voldoen. Maar toch zijn de getallen groot genoeg om technische ervaring op te doen en nieuwe methoden te ontwikkelen. Bovendien kunnen wij een zekere mate van compensatie vinden voor het verstoken van onze voorraden aardgas.

Een interessante mogelijkheid is om de bestemming van de Markerwaard open te houden, en die – bij succes van de proefparken – in te richten als energiepark-Nederland.

Conclusie

In de periode tot 2100 zullen klimaatverandering en het opraken van de voorraden goedkope gas en olie dwingen tot alternatieven. Op de schaal van EU-15 en zeker van Nederland is de inzet van biomassa, bij de huidige teeltefficiëntie, na 2050 niet verder uit te breiden. Ook voor wind zullen de planologische grenzen worden bereikt. Er blijven dus de volgende opties voor uitbreiding van de energievoorziening in de periode 2050 → 2100:

- wind + PV + opslag (indien realistisch)
- verhoging efficiëntie biomassateelt (indien dat lukt)
- kernfusie (als dat werkt)
- kernsplijting (nieuwe modellen, met Thorium vanwege de beperkte U voorraden)
- een aanzienlijk lager energieconsumptieniveau, afgedwongen door hoge prijzen

Aanbevelingen:

- Zowel op het niveau van de EU-15 en straks EU-25 ruimte reserveren voor het telen van biomassa voor energie en grondstoffen; onderzoek naar efficiencyverhoging van biomassateelt en biomassaconversie
- Aanvoer en verwerking van biomassa in het gebied van de Rotterdamse haven, aangevuld door de strategisch gelegen Eemshaven
- Op braakliggende gronden enkele proefparken inrichten voor de combinatie wind+biomassa en wind + PV
- De Markerwaard vrij houden voor energiepark-Nederland
- Studie naar de kwetsbaarheid van een intercontinentaal HVDC net voor menselijk falen of kwaadwilligheid
- Een dieet, matig in vlees, bevorderen
- Doorgaan met prijsverlaging zon-PV door voortgaande research en ontwikkeling, ondersteund door grote productie
- Research naar efficiencyverhoging van energie uit biomassa sterk ondersteunen

6.2 Prioriteiten analyse van de energieopties door Marc Beurskens

Per energieoptie is er een consumentengids-tabel opgesteld zoals geïntroduceerd in hoofdstuk 1. De resultaten komen voort uit plenaire discussies in de groep, en daar waar informatie ontbreekt zijn de tabellen aangevuld door de redactie. Tabel 6.2.1 geeft de resulterende indicaties voor aspecten per optie weer, ontleend aan de consumentengidsen. De tabel is geplaatst op een aparte pagina aan het eind van dit hoofdstuk 6.2, omdat hij 'dwars' moet worden afgedrukt. De beschouwde opties met hun afkorting staan in de eerste rij horizontaal. De aspecten waarop werd beoordeeld zijn in die tabel aangegeven in de eerste kolom. De uitstoot van CO₂ wordt niet meegenomen omdat deze als randvoorwaarde wordt gebruikt in hoofdstuk 6.3. In dit hoofdstuk 6.2 wordt gepoogd een rangorde te distilleren voor de prioriteiten van de energieopties. Een simpele manier zou zijn door de plussen en de minnen van de energieopties op te tellen en het resultaat van deze optelsom aan te merken als maat voor de prioriteit.

Daarmee zouden alle categorieën uit de consumentengids even zwaar tellen, waarmee meteen een belangrijk dilemma van de consumentengidsanalyse wordt aangegeven. Immers hoe kunnen ogenschijnlijk totaal verschillende aspecten tegen elkaar afgewogen worden? Hoe kan men bijvoorbeeld horizonvervuiling vergelijken met de risico's van radioactief afval, of met toevoerafhankelijkheid? Uiteindelijk zijn het politieke afwegingen die hier de doorslag geven.

Politieke gewichten

In dit hoofdstuk wordt gepoogd deze politieke afwegingen aan te geven door aan elk van de aspecten in de consumentengids een gewicht toe te kennen. Daarvoor nemen we twee politieke uitgangspunten: een "milieubewust" en een "milieuonverschillig" uitgangspunt. Vanuit beide politieke "visies" worden gewichten toegekend van 0 tot 2, waar 0 betekent dat het genoemde aspect niet meespeelt, 1 dat het aspect meespeelt, en 2 dat het aspect een belangrijke rol heeft in de politieke overweging. Deze politieke gewichten zijn voor elk van de aspecten in de consumenten gids aangegeven in tabel 6.2.2³⁰⁷.

Deze toekenning kent uiteraard tekortkomingen. Er zijn geen zogenaamde diskwalificerende aspecten. Kostprijs wordt bijvoorbeeld wel aangehaald als zijnde belangrijk in beide visies, maar te hoge kosten leiden niet tot diskwalificatie van de optie. Hetzelfde geldt voor aspecten als veiligheid, overig afval en voorzieningszekerheid. Deze analyse geeft ook niet aan hoe ver een bepaalde technologie ontwikkeld is. Kernfusie bijvoorbeeld zal pas in de tweede helft van deze eeuw een mogelijke significante rol kunnen spelen.

Als laatste zit in deze toekenning ook geen verwijzing naar het verleden. In een energiehuishouding zal men altijd uitgaan van een bestaande situatie. De energie infrastructuur heeft een typische levensduur van 30-50 jaar, een keuze voor een volgende periode zal daarom altijd sterk beïnvloed worden door de gemaakte keuzes in het verleden. De resultaten van deze prioriteitenanalyse zullen dus vooral de wenselijkheid van de inzet van elke energie optie aangeven.

³⁰⁷ De waarden voor de politieke gewichten zijn ingevuld door Peter Löhnberg, de auteur van hoofdstuk 6.3

Tabel 6.2.2: gewichten voor twee de “politieke visies” milieubewust en onverschillig

	Aspect	milieubewust	milieu-onverschillig	Afkorting
1	lage overige uitstoot	2	0	OU
2	ruimtesparend	1	0	RB
3	lage geluidsoverlast	1	0	GO
4	horizonsparing	1	0	HV
5	Acceptatie	2	0	AC
6	bedrijfsveiligheid	2	0	BR
7	gezondheidsveiligheid	2	0	GR
8	lage kosten	1	2	KT
9	Toevoeronafhankelijkheid	2	2	TA
10	weinig terrorisierisico	2	2	TR
11	non-proliferatie	2	0	PL
12	weersonafhankelijkheid	0	1	WA
13	Technische eenvoud	2	0	EV
14	inpasbaarheid	2	0	IP
15	duurzaam 200 jaar	2	0	DZ
16	ontwikkelingslanden	1	0	OL
17	kleine voetafdruk	2	0	VA

Prioriteiten van de opties

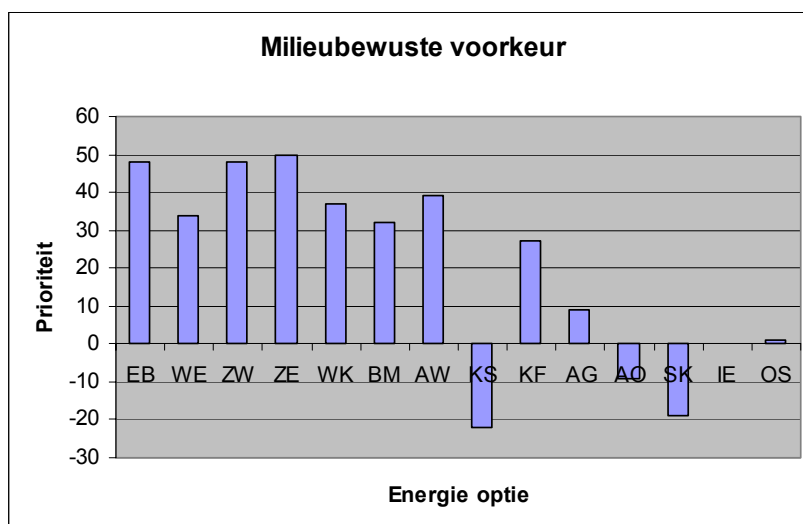
Desalniettemin is het een bruikbare oefening om een prioriteitenrangschikking samen te stellen. Daarvoor worden de resultaten van beide tabellen 6.2.1 en 6.2.2 gecombineerd tot een enkele voorkeurswaarde. Deze wordt gevonden door de indicaties uit tabel 6.2.1 om te zetten³⁰⁸ naar de scores (-2) tot (+2), die te vermenigvuldigen met de gewichten uit tabel 6.2.2 en deze producten per optie te sommeren over alle aspecten. Deze enkele voorkeurswaarde geeft aan welke prioriteit een bepaalde optie moet krijgen. Deze voorkeurswaarden worden aangegeven in Figuren 6.2.1 en 6.2.2 voor de milieubewuste en milieuonverschillige “visie”.

De milieubewuste “visie” geeft zoals verwacht een hoge prioriteit aan de duurzame opties zoals energiebesparing en de hernieuwbare energiebronnen, maar ook aan kernfusie. De milieu onverschillige “visie” let alleen op de kosten, Toevoerafhankelijkheid, terrorisierisico en weersafhankelijkheid. Bij deze overwegingen komen de prioriteiten voor alle opties veel minder verspreid uit de analyse.

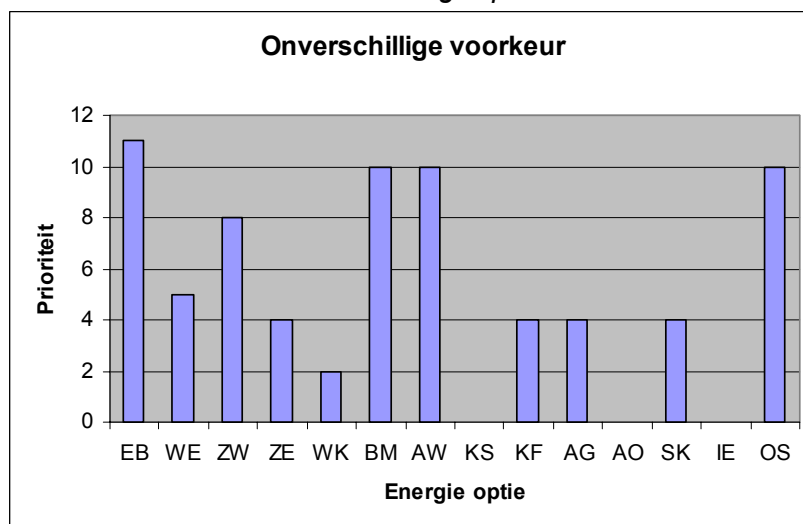
We richten ons nu op de milieubewuste “visie”. De politieke keuzes die uit de analyse volgen zijn samengevat in tabel 6.2.3. In deze tabel wordt de wenselijkheid per optie aangegeven zoal die uit de prioriteiten analyse volgt. Alle opties die hoog scoren zijn, interessant genoeg, opties die geen CO₂ uitstoten³⁰⁹. Voor de opties die laag scoren is ook aangegeven of zij kunnen bijdragen aan CO₂ emissie reductie.

³⁰⁸ De resulterende getallen zijn te vinden in tabel 6.3.5

³⁰⁹ CO₂ uitstoot wordt niet in de consumentengids aangegeven.



Figuur 6.2.1: Prioriteiten voor de verschillende energieopties in de milieu bewuste "visie"



Figuur 6.2.2: Prioriteiten in de milieu onverschillige "visie"

Tabel 6.2.3: prioriteiten voor de milieubewuste "visie" (H=Hoog; L=Laag)

	EB	WE	ZW	ZE	WK	BM	AW	KS	KF	AG	AO	SK	IE	OS
	H	H	H	H	H	H	H	L	H	Med.	L	L	L	L
CO ₂ reductie								ja					ja	ja

Optimalisatie van de energiemix

In het volgende hoofdstuk 6.3 wordt een optimaliseroutine geïntroduceerd waarin de prioriteiten uit figuur 6.2.1 en 6.2.2 worden gebruikt om uit een set randvoorwaarden de ideale energiemix voor Europa (EU-15) samen te stellen. In die optimalisatie wordt voor verschillende jaren, 2010, 2020, 2050 en 2100 bepaald hoe de meest wenselijke energie mix er uit moet gaan zien. De randvoorwaarden worden opgesteld door CO₂ emissie eisen, maximale inzetbaarheid van elk van de opties en door een stijgende energievraag

in Europa. De routine geeft een kwantitatieve invulling van tabel 6.2.3 voor de verschillende jaren.

Beperkingen van de prioriteiten toekenning

De prioriteiten analyse met behulp van de consumenten gids en de politieke gewichten uit de tabellen 6.2.1 en 6.2.2 geven een instrument in handen om de wenselijkheid van energie opties uit te drukken. Deze methode heeft ook duidelijke beperkingen. Samengevat zijn die als volgt te benoemen:

1. Alhoewel er gepoogd wordt politieke gewichten toe te kennen aan de argumenten in tabel 6.2.1, is het erg moeilijk de validiteit hiervan te toetsen. Om die reden is er gekozen voor een minimale spreiding in de gewichten (slechts de keuze uit 0, 1, en 2). Daardoor is het niet mogelijk om diskwalificerende argumenten aan te geven.
2. In de analyse spelen historische argumenten geen rol. Om die reden is het mogelijk dat er tussen twee opeenvolgende periodes in de optimalisatie in het volgende hoofdstuk een optie volledig weg kan vallen.
3. De analyse geeft slechts een wenselijkheid aan. De validiteit van de uitkomst in de optimalisatie routine in het volgende hoofdstuk hangt dus ook sterk af van de haalbaarheid van het maximale potentieel van verschillende opties. Deze haalbaarheid wordt in detail besproken in hoofdstuk 6.1.

Het is moeilijk om totaal verschillende facetten uit de consumenten gids te combineren tot één enkel getal of prioriteit. Het blijft uiteindelijk een politieke keuze of men de risico's van radioactief afval voor lief neemt en of men deze zwaarder laat wegen dan bijvoorbeeld toevoerafhankelijkheid of weersafhankelijkheid. Het is daarom ook af te raden een visie te ontwikkelen gebaseerd slechts op de uitkomst van deze analyse. Voor een meer gebalanceerde afweging per optie verwijzen we naar de afzonderlijke besprekingen van de energie opties in de hoofdstukken 2, 3, 4 en 5.

Tabel 6.2.1: Uitkomst van de consumentengids analyse voor de verschillende energie opties

	Energie- besparing	Wind energie	Zonne warmte	Zonne electriciteit	Water kracht	Biomassa	Aard- warmte	Kern- splijting	Kern- fusie	Aardgas	Aardolie	Steen- kool	Import Electriciteit	CO ₂ - opslag
Afkorting	EB	WE	ZW	ZE	WK	BM	AW	KS	KF	AG	AO	SK	IE	OS
Overige uitstoot	++	++	++	++	+	--	+	--	+	-	--	--	0	+
Ruimte besparing	++	+	+	++	-	--	+	0	++	+	0	-	0	++
Geluid Overlast	++	-	++	++	0	++	+	+	++	+	+	+	0	++
Horizonvervuiling	++	-	+	++	0	++	++	0	+	0	0	-	0	++
Publieke acceptatie	0	+	0	++	+	++	++	--	0	++	+	--	0	--
Bedrijfsveiligheid	++	+	++	++	++	++	+	0	++	+	-	-	0	-
Gezondheid veiligheid	++	++	++	++	++	++	+	-	++	+	+	-	0	-
Lage kosten	+	0	0	--	0	++	0	+	-	0	0	+	0	+
Toevoerafhankelijkheid	++	++	++	++	-	+	++	+	++	0	-	-	0	++
Terrorisierisico	++	+	++	++	++	++	++	--	0	+	0	+	0	+
Non-proliferatie	++	++	++	++	++	++	++	--	0	+	0	0	0	+
Weersafhankelijkheid	+	-	0	0	0	0	++	0	++	++	++	++	0	++
Technische eenvoud	++	+	++	0	++	+	+	-	--	+	0	0	0	--
Inpasbaarheid	++	+	++	+	+	-	+	0	++	0	0	0	0	++
Duurzaam in 200 jaar	++	+	++	++	++	++	+	-	++	--	--	--	0	--
Ontwikkelingslanden	0	+	++	++	++	++	+	-	0	-	0	0	0	-
Kleine voetafdruk	+	+	+	++	++	+	++	+	+	-	-	-	0	+

6.3. Optimale mix van energieopties door Peter Löhnberg

6.3.1. Probleemstelling

Dit hoofdstuk beschrijft eerst een aantal randvoorwaarden waaraan een acceptabele mix van bijdragen van energieopties moet voldoen. Daarna worden de in hoofdstuk 6.2 genoemde indicaties vertaald naar scores, worden aanvullende scores opgesteld voor fossiele brandstoffen en wordt aan elke score een gewicht toegekend. Een optimale mix maximaliseert de gewogen som van de optiescores binnen de randvoorwaarden.

In dit hoofdstuk wordt alleen EU15 beschouwd, in overeenstemming met het vorige hoofdstuk. De nagelopen jaren zijn 2010, 2020, 2050 en 2100 waarin bepaalde doelen gehaald moeten worden. Omdat de gewichten subjectief zijn, wordt hier het effect getoond van uitersten in de vorm van milieubewuste en milieuonverschillige gewichten.

Binnen de beschikbare tijd zijn zo nauwkeurig mogelijke gegevens verzameld. Die zullen desondanks onnauwkeurigheden bevatten. Verder is het aantrekkelijk voor de lezer, eigen gewichten toe te kennen. Ten slotte moet het programma met de invoer gecontroleerd kunnen worden. Daartoe beschrijft een aanhangsel de gebruikte formules en programmatuur. Het lezen daarvan is niet nodig voor het begrijpen van dit hoofdstuk.

6.3.2 Opties

Keuze

Van de in de vorige hoofdstukken beschreven opties worden waterkracht stuwmeer en waterkracht lopend samengenomen, wordt een berekening gemaakt met en zonder kernfusie wegens de nog onzekere praktische uitvoerbaarheid en zijn brandstofcel en schoon fossiel verdisconteerd in de toekomstige emissies in deel 6.3.3. Hoewel energiebesparing en CO₂-opslag geen energiebronnen zijn, worden ze wel meegenomen wegens hun relevantie voor het beleid. Verder zijn uiteraard de fossiele opties aardgas, aardolie en steenkool toegevoegd, evenals de import van elektriciteit. Dit resulteert tabel 6.3.1.

Tabel 6.3.1. Beschouwde opties

nr.	afk.	optie
1	EB	energiebesparing
2	WE	windenergie
3	ZW	zonnewarmte
4	ZE	zonne-elektriciteit
5	WK	waterkracht
6	BM	biomassa
7	AW	aardwarmte
8	KS	kernsplijting
9	KF	kernfusie
10	AG	aardgas
11	AO	aardolie
12	SK	steenkool
13	IE	import elektriciteit
14	OS	CO ₂ -opslag

Afkorting en nummer

Voor korte aanduiding is elke beschouwde optie voorzien van een afkorting volgens tabel 6.3.1. De daarin ook aangegeven optienummers worden gebruikt in het aanhangsel.

6.3.3 Randvoorwaarden voor gezamenlijke bijdragen

Gelijkheid van totaal energieverbruik aan geprojecteerd verbruik

Het jaarlijkse totale verbruik aan energie-inhoud van brandstoffen en besparing moet gelijk zijn aan het jaarlijkse geprojecteerde verbruik volgens tabel 6.3.2. Het geprojecteerde verbruik is gebaseerd op figuur 1.1. In dit rapport wordt de stijging in levensstandaard aanvaard, maar geprobeerd de bijbehorende emissies en het bijbehorende energieverbruik te beperken door hernieuwbare bronnen en door energiebesparing. Die energiebesparing wordt wel (fictief) geteld als een energieoptie, maar het is wel een optie zonder uitstoot.

Voor EU15 is het geprojecteerde gebruik verkregen door het totale energieverbruik van 68 EJ (exajoule = 10^{18} Joule) in 2001 (zie ook tabel 6.1.5) te extrapoleren volgens het globale verbruik voor alle industrielanden.³¹⁰

Tabel 6.3.2 Geprojecteerde primaire energieverbruik (zonder energiebesparing)

jaar	2010	2020	2050	2100	
geprojecteerde verbruik	75	82	102	114	EJ

Bovengrens voor CO₂-uitstoot

Volgens Kyoto moet in 2010 de CO₂-uitstoot 6% minder zijn dan in 1990. Het streefgetal voor 2050 is volgens het Europese groenboek 50% en voor 2100 zelfs 75% minder uitstoot dan in 1990. De uitstoot in 1990 voor EU15 was 3211 Mt (megaton = 10^9 kg)³¹¹ Daarom mag de uitstoot in 2010 en 2020 hoogstens $0,94 \times 3211 = 3018$ Mt zijn, in 2050 hoogstens $0,5 \times 3211 = 1605$ Mt en in 2100 hoogstens $0,10 \times 3211 = 321$ Mt.

De jaarlijkse CO₂-emissie per optie volgt uit het primaire energieverbruik voor die optie via de CO₂-emissiefactor voor die optie, dat is het aantal kg CO₂ per GJ (Gigajoule = 10^9 Joule) primaire energie. De emissiefactoren in het jaar 2001 in kg/GJ bij verbranding³¹² staan in tabel 6.3.3. Sims³¹³ geeft schattingen op basis van verbeterde technologie; technologieverbetering zal worden opgenomen als energiebesparing met een fictieve uitstoot nul voor de bespaarde Joules.

Tabel 6.3.3. Emissiefactoren als in 2001 in kg/GJ direct bij verbranding

optie	AG	AO	SK
2001	56	75	94

Geïmporteerde elektriciteit wordt verondersteld voor EU15 elders CO₂-neutraal te zijn opgewekt. Voor de overige niet vermelde opties is de uitstoot ook 0, terwijl opslag als negatieve emissie wordt beschouwd omdat die de netto uitstoot vermindert.

³¹⁰ IIASA/WEC global energy perspectives 1998

³¹¹ US International Energy Annual (2001) Table H1

³¹² www.energieweb.nl/ency/tabel/ency-co2.html

³¹³ Ralph E. H. Sims et al, Energy Policy 31 (2003) 1315-1326; verkorte versie van IPCC 2001, Mitigation, pp 235 ff

Ondergrens voor hernieuwbare bronnen

De Nederlandse overheid hanteert de doelstelling dat het aandeel duurzame energie (WE, ZW, ZE, WK, BM en AW) in 2010 5% en in 2020 10% van het totale energieverbruik zal zijn³¹⁴. In deel 6.3.7 wordt nagegaan, welke percentages voor de EU15 uit de optimalisatie volgen.

6.3.4 Grenzen voor afzonderlijke bijdragen

Bovengrenzen voor optiebijdragen

Tabel 6.3.4 toont de hoogst mogelijke bijdrage van elke optie met in de bovenste rij ter vergelijking de bijdrage in 2001. Voor de fossiele brandstoffen en kernsplijting is het huidige EU15 verbruik weer geëxtrapoleerd volgens de globale maxima van hoofdstuk 1. Voor de eenvoud is CO₂-export niet meebeschoofd. De getallen voor hernieuwbare energie in 2050 en 2100 zijn overgenomen uit tabel 6.1.5 voor het scenario 'alle zeilen bijzetten'. De argumentatie achter de cijfers is in hoofdstuk 6.1 aangegeven. De getallen voor 2010 en 2020 zijn geëxtrapoleerd, aannemende dat pas na 2010 de 'vaart' er in zit. Voor aardolie en aardgas is aangenomen dat de getallen uit tabel 6.1.5 wel ongeveer de maxima zullen zijn, omdat deze fossiele brandstoffen schaarser en duurder zullen worden. Aan steenkool is veel voorraad aanwezig tegen lage prijzen. Aangenomen is dat voor 2050 en 2100 het drievoudige haalbaar is van de getallen uit tabel 6.1.5. Voor 2010 en 2020 is weer een interpolatie gehanteerd, waarbij opnieuw is aangenomen dat pas na 2010 de vaart er in komt.

Tabel 6.3.4. Hoogst mogelijke jaarlijkse optiebijdragen (zonder kernfusie)

jaar	EB	WE	ZW	ZE	WK	BM	AW	KS	AG	AO	SK	IE	OS
2001	0	0,3	0	0,02	4	0,6	0,05	9	16	29	9	0	0
2010	2	0,5	1	0,03	4	2	0,2	9	15	28	12	0	72
2020	5	1,0	3	0,04	5	10	1	12	14	26	25	1	145
2050	21	7,4	15	1,0	8	20	3	15	5	10	54	2	360
2100	27	10,0	17	12	8	25	6	25	0	0	81	4	720
eenh.	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	Mt

In tabel 6.1.5 zijn sommige getallen niet ingevuld, omdat die onderwerp waren van een scenariodiscussie. Maar nu moeten wel degelijk maxima worden aangegeven. Voor ZE = zonelektriciteit is voor 2100 de maximale schatting van de zonne-elektriciteitsproducenten genomen: 4.7 EJe, hier gesteld op 12 EJ primair. Voor biomassa is 10 % van een redelijke wereldopbrengst in 2050 genomen en voor 2100 nog wat winst in opbrengst per km². Bij kernsplijting wordt ondersteld dat in de loop van de eeuw nieuwe types in de handel komen, die wat veiliger zijn en – afgezien van de politieke wenselijkheid – een groei zouden kunnen doormaken. Import van duurzame elektriciteit zal worden begrensd door koppelnetten en de beschikbaarheid. Het lijkt veilig om hier een waarde te nemen ruim onder zon en wind voor de EU15. De totale opslagcapaciteit van CO₂ in EU15 wordt geschat op 36000 Mt alleen al in gas- en olievelden. Aangenomen wordt dat deze opslagmogelijkheden geleidelijk beschikbaar komen, met een lineaire toename, terwijl andere opslagmogelijkheden inspringen als de 36000 Mt niet wordt gehaald dan wel in reserve blijven voor de volgende eeuw.

³¹⁴ www.energie.nl/stat/trends093.html

Er wordt een aparte berekening gemaakt voor het geval dat kernfusie een significante bijdrage gaat geven. Dat kan voor het eerst in 2100 ter waarde van 12 EJ (primaire energie) bedragen. Voor deze tweede berekening blijven alle overige getallen hetzelfde.

Ondergrenzen voor optiebijdragen

Alle verbruiken behalve de import van elektriciteit moeten nul of groter zijn. Die import wordt uitgedrukt in het primaire energieverbruik bij de opwekking die negatief zou kunnen worden door export, waarvan wordt aangenomen dat die niet plaats vindt. De CO₂-opslag zou negatief kunnen worden door het ontsnappen van CO₂ uit de opslag. Aangenomen is dat dit ook niet gebeurt. Verder is verondersteld dat het gebruik van fossiele brandstof tot 2010 geheel kan worden afgebouwd. Dit leidt ertoe, dat alle ondergrenzen 0 worden.

6.3.5 Randvoorwaarden in 2010 nog niet bereikbaar Bij maximale inzet van alle bronnen volgens de bovengrenzen van deel 6.3.4 haalt de maximale energieproductie in 2010 met 74 EJ bijna de als randvoorwaarde in deel 6.3.3 afgeleide 75 EJ. Maar de resulterende emissie zit dan met 3996 Mt ruim boven de toegestane 3018 Mt. Dus is geen optimale mix binnen die randvoorwaarden te vinden. Daarom zal in deel 6.3.7 alleen vanaf 2020 geoptimaliseerd worden. Het gaat tenslotte om succes op termijn.

6.3.6 Aspecten van opties

Keuze, nummer en afkorting

Van de in de andere hoofdstukken van dit document aangegeven indicaties voor aspecten zijn broeikasgas en potentieel hierboven al apart beschouwd. Ontwikkelingslanden stedelijk en ruraal worden wegens hun soortgelijkheid gemiddeld. De resulterende 17 aspecten zijn in tabel 6.2.2 voor eenvoudige verdere aanduiding voorzien van een afkorting en voor het aanhangsel van een nummer.

Aanvulling van ontbrekende indicaties voor aspecten per optie

Tabel 6.2.1 toont de in de andere hoofdstukken genoemde indicaties zoals geïnterpreteerd door de auteur (PL). Omdat van de in dit hoofdstuk toegevoegde optie IE niet bekend is hoe die is opgewekt, zijn daarvoor neutrale indicaties 0 ingevuld. Voor de eveneens toegevoegde opties AG, AO en SK zijn schattingen ingevoerd.

Van indicatie naar score

De in tabel 6.2.1 aangegeven indicaties moeten voor de optimalisatie vertaald worden naar een score, dat is een getal dat aangeeft hoe sterk dat aspect is. Hier is de eenvoudige vertaling gebruikt van - - naar -2, van - naar -1, van 0 naar 0, van + naar 1 en van ++ naar 2. Dit resulteert in tabel 6.3.5. Als men zou vinden dat - - en ++ gevoelsmatig meer dan 2x zo sterk zouden zijn als - en +, zou men andere scores kunnen kiezen.

6.3.7 Optimalisatie

Gewichten met waardering

Niet iedereen vindt alle aspecten even belangrijk. Daarom is het zinvol, aan ieder aspect een gewicht toe te kennen. Dit is echter subjectief. Daarom is ervoor gekozen, in tabel 6.2.2 als uitersten een milieubewuste en een milieunverschillige keuze voor deze gewichten van 0 tot 2 te kiezen. Bij de milieunverschillige gewichten spelen alleen kosten, toevoerafhankelijkheid, terrorismerisico en weersonafhankelijkheid (rijen 6, 9, 10 en 12) een rol. Voor allebei zullen optimalisaties worden uitgevoerd. Aan elke mogelijke mix van opties wordt dan een waardering toegekend, die gelijk is aan de som

Tabel 6.3.7. Optimale mixen voor milieuonverschillige gewichten

jaar	EB	WE	ZW	ZE	WK	BM	AW	KS	KF	AG	AO	SK	IE	OS
2020	5	1	3	0,04	5	10	1	12	0	14	23	6,96	1	145
2050	21	7,4	15	1	8	20	3	2,7	0	5	0	17,9	1	360
2100 (-KF)	27	10	17	12	5,9	25	6	0	0	0	0	11	0	720
2100 (+KF)	27	10	17	9,6	0	25	6	0	9,6	0	0	9,8	0	720
	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	EJ	Mt

Resulterende uitstoot en hernieuwbare inzet (voor 2100 zonder en met kernfusie)

Tabel 6.3.8 toont de resulterende uitstoot en inzet van hernieuwbare bronnen.

Tabel 6.3.8. Uitstoot en hernieuwbare inzet

gewicht	milieubewust				milieuonverschillig				
	2020	2050	2100 -KF	2100 +KF	2020	2050	2100 -KF	2100 +KF	
jaar	2020	2050	2100 -KF	2100 +KF	2020	2050	2100 -KF	2100 +KF	
uitstoot	2961	670	-720	-720	3018	1605	321	203	Mt
hernieuwbaar	26	67	90	90	26	67	87	78	%

Discussie

Uit de vette getallen in tabellen 6.3.6 en 6.3.7 blijkt het enige verschil in 2020 tussen milieubewuste en milieu-onverschillig te zijn dat de eerste meer AO inzet en de laatste meer SK. Dat beide maximale KS inzetten komt doordat volgens tabel 6.3.8 de uitstoot met 2961 resp. 3018 Mt tegen het maximum van 3018 Mt aanzitten. Verhoging van EB zou voor beide gewichten leiden tot het niet hoeven inzetten van KS.

In 2050 kiest milieubewust volgens tabellen 6.3.6 en 6.3.7 voor meer KS, AO en IE en minder SK dan milieuonverschillig met als gevolg volgens tabel 6.3.8 minder uitstoot. Ook hier zou hogere EB de inzet van KS onnodig maken.

In 2100 zonder KF kiest milieubewust volgens tabel 6.3.6 voor meer WK, KS en IE en geen SK. Doordat geen fossiele bronnen worden ingezet en wel de maximale CO₂-opslag van 720 Mt volgens tabel 6.3.4, ontstaat volgens tabel 6.3.8 een uitstoot van – 720 Mt. Milieu-onverschillig zet wel fossiele bronnen in met uiteraard negatieve gevolgen voor de uitstoot. Ook hier zou meer EB de inzet van KS onnodig maken.

Met KF laat milieubewust KS en EI schieten en gebruikt milieu-onverschillig minder ZE, WK en SK en meer KF. Wat opvalt is, dat geen van beiden de maximale KF van 12 EJ inzetten.

6.3.8 Conclusie

Het voldoen aan de limiet voor CO₂-emissie lukt in 2010 nog niet bij stijgende levensstandaard. In 2020 kan de emissielimiet net gehaald worden bij inzet van kernsplijting. Wel ligt de hernieuwbare bijdrage dan ruim boven de minimaal vereiste 10%. In 2050 leidt een milieubewuste keuze tot minder uitstoot. In 2100 is maximale inzet van hernieuwbare bronnen onvoldoende om aan een stijgende energievraag te voldoen. Dan neemt milieubewust haar toevlucht tot kernsplijting en milieu-onverschillig tot fossiele

brandstoffen. Indien kernfusie haalbaar blijkt, is deze inzet van kernsplijting niet meer nodig. Tevens zal daar ook niet voor gekozen worden bij verdergaande energiebesparing.

De inzet van kernsplijting wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de kortlevendheid van het afval niet is opgenomen bij de aspecten. Juist dit argument van solidariteit met toekomstige generaties blijkt in discussies een grote rol te spelen bij de afwijzing van kernsplijting. Daarom stelt de auteur voor, dit aspect in een volgende versie van dit rapport mee te nemen.

6.3.A Aanhangsel voor controle en optimalisatie met andere gegevens

Formules

Opties worden aangeduid met hun *optienummer* $o = 1, 2, \dots, O = 14$ volgens tabel 6.3.1.

De te bepalen energieproducties en OS worden samen beschreven door een *vector van optiebijdragen* x_o :

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14}]' = [\mathbf{p}' \ \mathbf{s}]'$$

met een vector van *jaarlijkse Nederlandse verbruiken* p_o voor optie o

$$\mathbf{p} = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7 \ p_8 \ p_9 \ p_{10} \ p_{11} \ p_{12} \ p_{13}]'$$

en met *jaarlijkse Nederlandse CO₂-opslag (storage)* $x_{14} = s$.

Gelijkheidsrandvoorwaarde is dat het jaarlijkse *totale energieverbruik* inclusief besparing

$$t = \sum_{o=1}^{13} p_o = \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} = g$$

met g de *gelijkheidsscalar gewenst verbruik* (tabel 6.3.2) en met *gelijkheidsvector*

$$\mathbf{g} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0].$$

De ongelijkheid is dat de totale jaarlijkse CO₂ *emissie*

$$c = \sum_{o=1}^{13} c_o - s = \sum_{o=1}^{13} \mathbf{e}_o \cdot p_o - s = \mathbf{e} \cdot \mathbf{x} \leq c_M$$

met jaarlijkse CO₂-emissie per optie $c_o = \mathbf{e}_o \cdot p_o$ met \mathbf{e}_o de *emissiefactor* in *emissierijvector*

$$\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ e_5 \ e_6 \ e_7 \ e_8 \ e_9 \ e_{10} \ e_{11} \ e_{12} \ e_{13} \ -1]$$

en met *maximale emissie* $c_M = 3018$ in 2010 en 2020, = 1605 in 2050 en = 321 in 2100

en omzetting van de emissiefactoren uit tabel 6.3.3 volgens $1 \text{ kg/GJ} = 10^{-9} \text{ Mt} / 10^{-6} \text{ PJ} = 1 \text{ Mt/EJ}$.

Elk element van \mathbf{x} is in eerste instantie begrensd volgens

$$\mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{h}$$

met vector van *hoogst* mogelijke waarden \mathbf{h} volgens tabel 6.3.4 en vector van *laagst* mogelijke waarden $\mathbf{l} = \mathbf{0}$.

Een aanpassingsprogramma verhoogt de maximale energiebesparing in \mathbf{h} tot voldaan kan worden aan de energiebehoefte.

De *score* s_{ao} van aspect $a = 1, \dots, A = 17$ van optie o volgens tabel 6.3.5 leveren een $O \times A$ matrix \mathbf{S} met alle s_{ao} 's, waarbij de rijen van tabel 6.3.5 de kolommen van \mathbf{S} vormen en de kolommen van tabel 6.3.5 de rijen van \mathbf{S} .

De te minimaliseren kostenfunctie is de *negatieve waardering*

$$k = -\sum_{o=1}^{13} \sum_{a=1}^{17} w_a s_{ao} x_o = \mathbf{f}' \cdot \mathbf{x}$$

met volgens tabel 6.2.2 milieubewuste of milieunverschillige vector van *gewichtsfactoren* \mathbf{w}_B en \mathbf{w}_O en vector van *negatieve factoren*

$$\mathbf{f} = -\mathbf{S} \cdot \mathbf{w}.$$

Voor optimalisatie is gebruik gemaakt van de Optimization Toolbox binnen de technische computertaal Matlab³¹⁵. Die bevat de routine linprog (\mathbf{f} , \mathbf{O} , \mathbf{o} , \mathbf{G} , \mathbf{g} , \mathbf{l} , \mathbf{h}), die de waarde van \mathbf{x} oplevert die $\mathbf{f}' \cdot \mathbf{x}$ minimaliseert zo dat voldaan is aan de ongelijkheid $\mathbf{O} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{o}$, aan de gelijkheid $\mathbf{G} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{g}$ en de grenzen $\mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{h}$. Omdat er maar één gelijkheid en ongelijkheid is, volgt de optimale mix uit de vereenvoudigde versie

$$\mathbf{x}^* = \text{linprog}(\mathbf{f}, \mathbf{o}, \mathbf{o}, \mathbf{g}, \mathbf{g}, \mathbf{l}, \mathbf{h}).$$

Daarna kan vastgesteld worden dat \mathbf{x}^* voldoet aan de ongelijkheden door het bepalen van de totale CO₂ emissie $\mathbf{e} \cdot \mathbf{x}$ en wat de grootte is van het deel natuurlijke bronnen

$$n = (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7) / (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13}).$$

Programma's

Hoofdprogramma OPTENMIX.M

```
% OPTENMIX.M optimale mix van energieopties
format long g
S = [ 2, 2, 2, 2, 0, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 0, 1; ... % rij 1
      2, 1,-1,-1, 1, 1, 2, 0, 2, 1, 2,-1, 1, 1, 1, 1, 1; ... % rij 2
      2, 1, 2, 1, 0, 2, 2, 0, 2, 2, 2, 0, 2, 2, 2, 2, 1; ... % rij 3
      2, 2, 2, 2, 2, 2, 2,-2, 2, 2, 2, 0, 0, 1, 2, 2, 2; ... % rij 4
      1,-1, 0, 0, 1, 2, 2, 0,-1, 2, 2, 0, 2, 1, 2, 2, 2; ... % rij 5
      -2,-2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 0, 1,-1, 2, 2, 1; ... % rij 6
      1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 0, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 2; ... % rij 7
      -2, 0, 1, 0,-2, 0,-1, 1, 1,-2,-2, 0,-1, 0,-1,-1, 1; ... % rij 8
      1, 2, 2, 1, 0, 2, 2,-1, 2, 0, 0, 2,-2, 2, 2, 0, 1; ... % rij 9
      -1, 1, 1, 0, 2, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 2, 1, 0,-2,-1,-1; ... % rij 10
      -2, 0, 1, 0, 1,-1, 1, 0,-1, 0, 0, 2, 0, 0,-2, 0,-1; ... % rij 11
      -2,-1, 1,-1,-2,-1,-1, 1,-1, 1, 0, 2, 0, 0,-2, 0,-1; ... % rij 12
      0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0; ... % rij 13
      1, 2, 2, 2,-2,-1,-1, 1, 2, 1, 1, 2,-2, 2,-2,-1, 1]; % rij 14 scores
g = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0]; % gelijkheidsrijvector
e = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,56,75,94,0,-1]; % emissiefactoren
l = [0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0];
wM=[2;1;1;1;2;2;2;1;2;2;2;0;2;2;2;1;2]; % gewichten milieubewust
wO=[0;0;0;0;0;0;0;2;2;2;2;0;1;0;0;0;0;0]; % gewichten milieunverschillig
'2010', v = 75; o = 3018; %jaar, vereiste productie, emissie
h = [2;0.5;1;0.03;4;2;0.2;9;0;15;28;12;0;72]; % bovengrenzen
t = g*h, c = e*h % maximale energieproductie en bijbehorende emissie
'2020', v = 82;
h = [5;1;3;0.04;5;10;1;12;0;14;26;25;1;145];
'milieubewust', w = wM; optimaal, 'onverschillig', w = wO; optimaal % optimale mixen
'2050', v = 102; o = 1605;
h = [21;7.4;15;1;8;20;3;15;0;5;10;54;2;360];
'milieubewust', w = wM; optimaal, 'onverschillig', w = wO; optimaal
'2100-KF', v = 114; o = 321;
h = [27;10;17;12;8;25;6;25;0;0;0;81;4;720];
'milieubewust', w = wM; optimaal, 'onverschillig', w = wO; optimaal
'2100+KF', v = 114; o = 321;
h = [27;10;17;12;8;25;6;25;12;0;0;81;4;720];
'milieubewust', w = wM; optimaal, 'onverschillig', w = wO; optimaal
```

Subroutine OPTIMAAL.M

```
% OPTIMAAL.M optimaliseert
f=-S*w; % factoren
O = e; % ongelijkheidsmatrix
x = linprog(f,O,o,g,v,l,h) % optimale mix
```

³¹⁵ www.mathworks.com

```
c = e*x % emissie
n = (x(2)+x(3)+x(4)+x(5)+x(6)+x(7))/...
(x(2)+x(3)+x(4)+x(5)+x(6)+x(7)+x(8)+x(9)+x(10)+x(11)+x(12) +x(13)) % deel natuurlijk
```

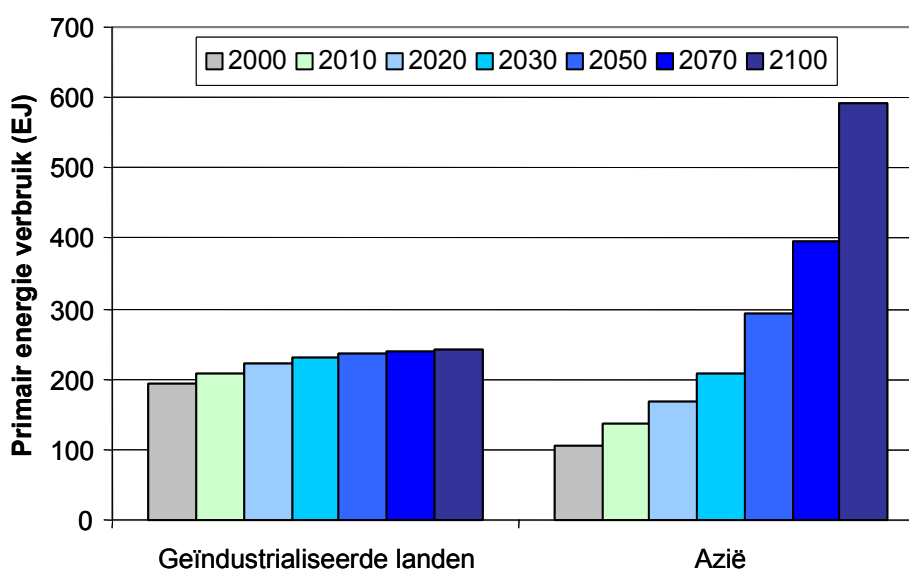
Dankwoord

De auteur van dit hoofdstuk 6.3 dankt de commissieleden voor hun commentaar op de opzet, suggesties voor te beschouwen opties en indicaties voor aspecten van opties, de redactie voor het kritisch lezen en becommentariëren van eerdere versies en Egbert Boeker tevens voor de kwantitatieve invoer en het constructieve meedenken bij de totstandkoming van de uiteindelijke versie.

6.4 Implementatie in ontwikkelingslanden; voorbeeld China door Marc Beurskens

Uit de analyse in hoofdstuk 6.1 blijkt dat de energiehuishouding in Europa omgevormd kan worden zodat er voldaan wordt aan de emissie restricties voor broeikasgassen. De analyse laat ook zien dat als we alles op alles zetten in Europa daarvoor geen kernenergie nodig is. Maar dat kost wel een zeer grote inspanning. Dit vereist voor alle duurzame energiebronnen dat de maximaal mogelijk capaciteit ingezet wordt³¹⁶. Mocht het zo zijn dat we op één gebied tekort schieten dan lijkt het welhaast noodzakelijk kernenergie in de vorm van kernsplijting in te zetten.

Hoe is die situatie voor ontwikkelingslanden? Waar het rijke westen misschien 50% meer energie gaat gebruiken de komende 100 jaar geldt dat voor vele ontwikkelingslanden dat het energieverbruik maar liefst 600% zal gaan stijgen (Figuur 1.4). In figuur 6.2.1 is die vergelijking nogmaals gemaakt voor alle geïndustrialiseerde landen en voor Azië. In dit hoofdstuk gaan we niet proberen om een soortgelijke analyse te maken voor de wereld in zijn geheel zoals dat in hoofdstuk 6.1 gedaan is, maar laten we zien aan de hand van een voorbeeld dat de uitdaging voor ontwikkelingslanden zo mogelijk nog veel groter is dan voor Europa. Als voorbeeld kiezen we China, de grootste groeier onder de Aziatische landen.



Figuur 6.2.1: Primaire energievraag voor de geïndustrialiseerde landen voor de komende 100 jaar vergeleken met de sterk groeiende vraag in Azië³¹⁷, en met name in China.

China: een groeiende reus.

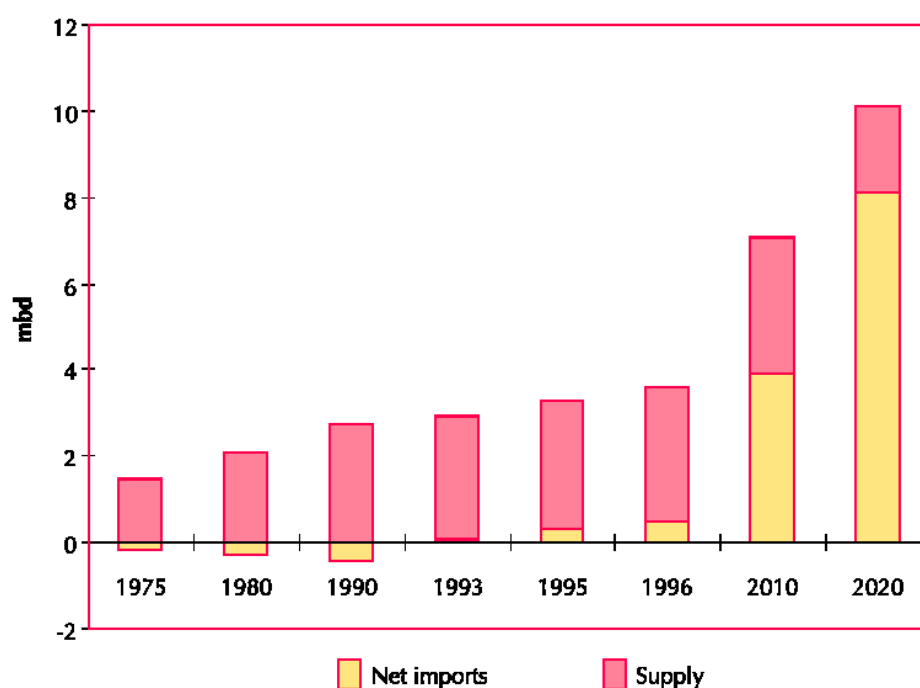
De hervormingen in China die zo'n 25 jaar geleden begonnen zijn hebben een enorme groei in de vraag naar energie veroorzaakt. Energie, die nodig is om de sterk groeiende industriële en commerciële activiteiten en groeiende levensstandaard van de Chinese huishoudens mogelijk te maken. Tot voor kort had China voldoende voorraden kolen en

³¹⁶ Met maximaal inzetbare capaciteit wordt de economisch haalbare capaciteit verondersteld zoals die in 6.1 afgeschat is.

³¹⁷ IIASA website: http://www.iiasa.ac.at/cgi-bin/ecs/book_dyn/bookcnt.py, B-scenario.

olie om de groeiende vraag aan te kunnen, en dus zelfstandig in haar energiebehoefte te voorzien. In een paar jaar tijd is China veranderd van een olie-exporterend land naar een olie-importerend land. In 1990 exporteerde China nog 5 maal zoveel ruwe olie als dat het importeerde, in 1997 is die balans omgekeerd en exporteert het nog maar de helft van wat het importeert³¹⁸.

Figuur 6.2.2 laat zien hoe de import-export-balans is veranderd in de afgelopen 30 jaar en laat tevens projecties zien naar 2020. China is dus al sterk afhankelijk van import van energiebronnen, en zal dat in de toekomst meer en meer worden. Dit heeft uiteraard gevolgen voor de internationale energiemarkt. Er wordt nu al gespeculeerd dat de huidige (anno mei 2004) hoge prijzen van kolen en olie voor een gedeelte toe te kennen is aan krapte op de markt door de groeiende import van energiebronnen door de Chinezen³¹⁹. De verdere discussie in dit hoofdstuk is ontleend aan het IEA rapport "China's world wide quest for energy" uit 2000. Alle plaatjes, getallen en projecties die in deze tekst gebruikt zijn komen uit dat rapport.



Figuur 6.2.2: olie import en export door China van 1975 tot 2020. China is veranderd van een Olie exporterend land naar een olie importerend land in de periode 1990-2000³²⁰.

Industriesector

De industriesector in China verbruikt 2/3 (1995) van de totale Chinese energieconsumptie. Dit zit voor 50% in warmteproductie voor de ijzer, staal en chemische industrie. Als brandstof wordt met name kolen gebruikt. De Chinese industrie blinkt uit in inefficiënt energieverbruik. Gemiddeld is de industriesector zo'n 30-50% minder efficiënt

³¹⁸ Internationaal energie agentschap (IEA) rapport "China's world wide quest for energy", 2000

³¹⁹ Reuters persbureau

³²⁰ Uit IEA rapport "China's world wide quest for energy", 2000. Ook alle andere gegevens in dit hoofdstuk zijn ontleend aan dat rapport.

dan soortgelijke Westerse sectoren. Verwacht wordt ook dat olie en gas meer en meer de rol van kolen gaan overnemen.

Commerciële en huishoudelijke sector

Deze sector omvat ongeveer 20% (in 1995) van het Chinese energie verbruik. Olie en gas zullen ook in deze sector het gebruik van kolen meer en meer gaan vervangen. Dit is echter niet het geval in rurale gebieden waar het gebruik van kolen zal blijven domineren en het gebruik van traditionele biomassa³²¹ zal substitueren. Het gebruik van aardgas in stedelijke gebieden wordt actief gestimuleerd door de overheid om smog door kolengebruik te reduceren.

Transport sector

Transport maakt 9 procent uit van de uiteindelijke energie consumptie in 1995. Vergeleken met het gemiddelde van 33% in de OECD is dat erg weinig. Slecht 3 op de 1000 mensen heeft een auto, terwijl dat in Duitsland bijvoorbeeld 1 op de 2 mensen een auto heeft. Verwacht wordt dat de transportsector een kleine 5% per jaar gaat groeien, waardoor er in 2020 een verdrievoudiging plaatsvindt.

Elektriciteitssector

In 10 jaar tijd is de vraag naar elektriciteit verdubbeld in China, in de periode van 1990 tot 2000, en de verwachtingen zijn dat er in 2020 een verviervoudiging plaats zal hebben gehad. Op jaar basis plaatst China zo'n 16 GW aan capaciteit bij³²². Dat komt neer op het elke drie weken plaatsten van het equivalent van één grote 1 GW kolencentrale, of het elk jaar bijplaatsen van de totale Nederlandse elektriciteitsvoorziening. Verwacht wordt dat er in 2020 zo'n 757 GW aan capaciteit geplaatst zal zijn.

In de industrie sector zal elektriciteit verbruik toenemen ten kosten van direct gebruik van kolen, en in de commerciële en huishoudelijke sector zal het gebruik van elektrische apparaten sterk groeien. Voor de uiteindelijke primaire energie mix is het uiteraard van belang hoe die elektriciteit is geproduceerd.

Toekomstig energie verbruik: de grootste CO₂ producent in 2020

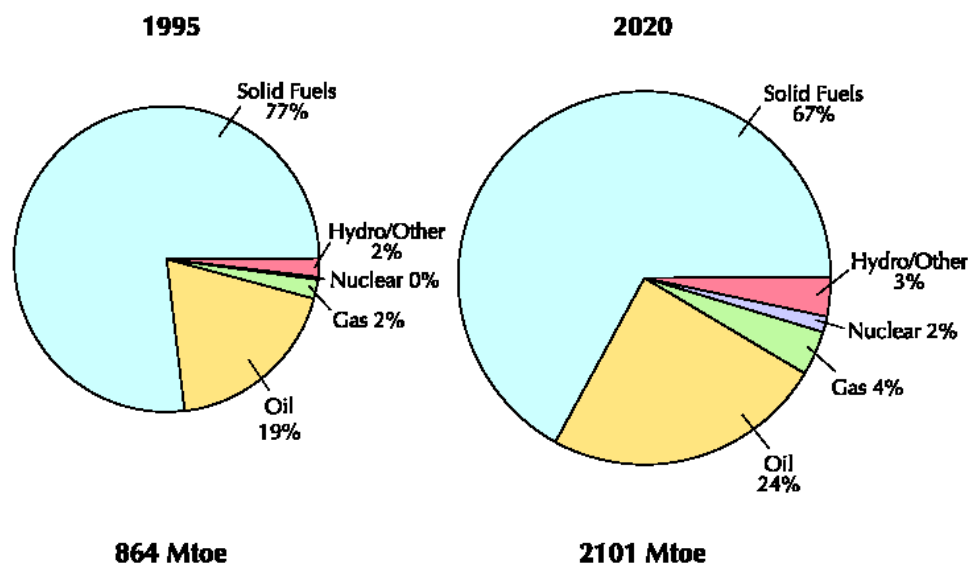
Figuren 6.2.3 en 6.2.4 geven projecties van het Chinese primaire energie en elektriciteitsverbruik voor 2020. Deze projectie is maar over 20 jaar gemaakt, en laat zien dat er naast een sterk groei niet veel gebeurt in de verdeling van de energiebronnen. Het is overduidelijk dat steenkool in 2020 nog steeds de belangrijkste brandstof zal zijn.

We kunnen van China niet verwachten dat zij voor 2020 al maatregelen gaan nemen om de energievoorziening duurzamer te maken, en er voor te zorgen dat er minder CO₂ uitgestoten wordt dan volgens dit referentiescenario het geval zal zijn. Tegelijkertijd zal China in 2020 de grootste producent zijn van CO₂, waarmee het de VS voorbij zal streven.

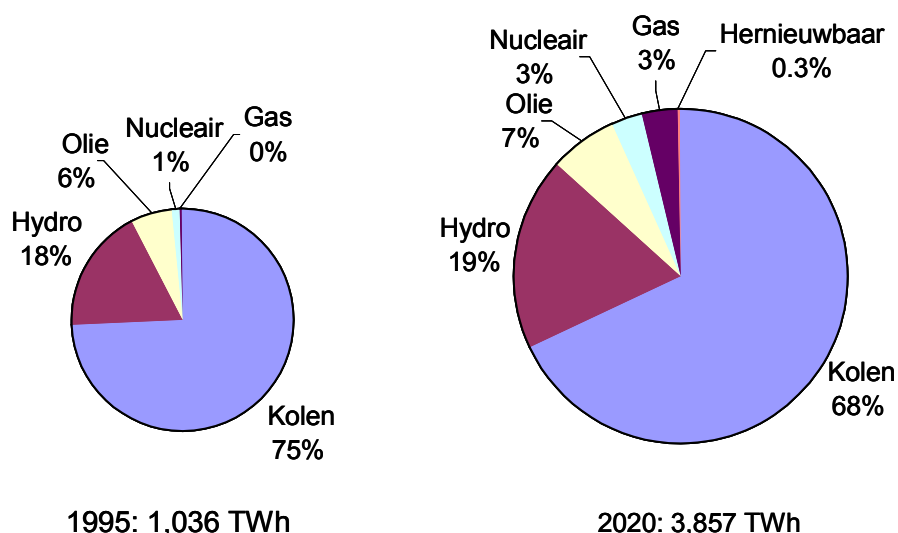
³²¹ Traditionele biomassa gebruik is inefficiënt en vaak niet duurzaam. Zie hoofdstuk 1 onder "Energie en armoede".

³²² 16 GW op jaar basis komt overeen met bijna de volledige capaciteit van de Nederlandse elektriciteitsproducenten bij elkaar opgeteld.

Na 2020 gaat de energievraag echter nog verder stijgen, zoals in figuur 6.2.1 is aangegeven. In deze latere periode moet China als het meest ontwikkelde van de ontwikkelingslanden wel degelijk een grote rol gaan spelen bij de reductie van broeikasgasemissies. Figuur 1.14 laat zien dat in de periode tussen 2020 en 2030 China zich moet gaan opmaken voor sterke emissie reducties. Wat zijn de mogelijkheden voor China?



Figuur 6.2.3: Primair energie verbruik in China voor 1995 en geprojecteerd naar 2020. In deze relatief korte periode zal het energieverbruik meer dan verdubbelen. Vergelijk dat met een 5-10% toename van energie verbruik in de geïndustrialiseerde landen. Ondanks dat de rol van olie, gas, hydro en nucleair zal gaan groeien blijven kolen de energiesector domineren



Figuur 6.2.4.: elektriciteit verbruik in China in 1995 en geprojecteerd naar 2020. De vraag naar elektriciteit groeit nog sterker dan die naar primaire energie. Verwacht wordt, dat alhoewel het volume van hydro, gas, olie en nucleair zal toenemen, kolen de belangrijkste grondstof zal blijven voor de Chinese elektriciteitsproductie

Mogelijke maatregelen om CO₂ emissies te reduceren

- Energie efficiëntie: de Chinese energiehuishouding is nog steeds erg *inefficiënt*. In de industrie en elektriciteitssector kunnen nog efficiëntie verbeteringen worden gehaald van zo'n 30-50%
- Hydro heeft een potentieel van zo'n 290 GW economisch exploitatieerbare capaciteit. In 1996 stond daarvan al reeds 56 GW geplaatst. ER wordt momenteel veel geïnvesteerd in hydro centrales in China met de grootste project de Drie Kloven Dam waar een centrale van 18GW aan gekoppeld wordt. Er is dus nog veel potentieel, maar daar zijn wel hoge maatschappelijke kosten aan verbonden.
- Duurzame energiebronnen (buiten Hydro) zullen een sterke absolute groei gaan zien. Relatief t.o.v. de conventionele bronnen zullen ze in 2020 echter nog maar een erg kleine rol spelen (zo'n 0.3% van de elektriciteit).

Vooraf windenergie heeft veel potentieel in China. Verwacht wordt dat er 2 GW in 2010 en 4 GW in 2020 geplaatst zal zijn.

China is verantwoordelijk voor 20% van de totale wereld biomassa energie consumptie. Zo'n 700 miljoen Chinezen zijn afhankelijk van traditionele biomassa. Het beleid is om deze mensen zo spoedig mogelijk toegang te verlenen tot moderne energie. Helaas is het niet zo dat deze inspanningen gericht zijn op uitbreiden van de capaciteit van moderne biomassa. Het aandeel biomassa zal waarschijnlijk af gaan nemen.

- Omschakelen van kolen naar gas en olie is een andere optie om op korte termijn een grote emissie reductie te bewerkstelligen. Olie voorraden in China zijn echter erg onzeker, en een toename in olie consumptie zal dus gepaarde moeten gaan met een toename van olie-import. Hetzelfde geldt voor gas. China heeft grote voorraden gas in de vorm van kolengas. Verwacht wordt dat zo'n 10% van de gas consumptie in 2020 voorzien kan worden met "eigen gas". De rest zal geïmporteerd moeten worden uit het middenoosten.
- Nucleair: China is haar nucleaire park sterk aan het uitbreiden. Er zijn nu plannen voor 8 nieuwe kerncentrales centrales. In 2010 zal China ongeveer 10 GW aan kerncentrales hebben geïnstalleerd en in 2020 zo'n 20 GW.
- CO₂ opslag: Het is de auteur niet bekend wat de capaciteit is m.b.t. het opslaan van CO₂ in China. Aangezien kolen in 2020 nog meer dan 60% van de energiehuishouding uitmaken, is CO₂ opslag een zeer belangrijke optie om de energievoorziening klimaatneutraal te maken.

Uit deze opsomming moge blijken dat China al veel investeringen doet in nieuwe energiebronnen vooral om de voorzieningszekerheid veilig te stellen. Wil China de verwachte groei in energie vraag blijven houden, en tegelijkertijd de emissies drastisch omlaag brengen dan moeten er drastische hervormingen plaatsvinden in de energiehuishouding. Het lijkt erop dat energie efficiëntie een belangrijke rol moet gaan spelen. Hiervoor zou er een technologie transfer met schonere technologieën uit geïndustrialiseerde landen moeten plaatsvinden. De rol van duurzame bronnen buiten hydro en biomassa lijken beperkt, maar het potentieel op de lange termijn is groot. Kolen vervangen door gas is een optie, maar zou het land meer afhankelijk maken van import van brandstoffen, met de daarbijbehorende nadelen. Het klimaat voor kernenergie is een stuk gunstiger in China dan in geïndustrialiseerde landen omdat publieke opinie nu eenmaal niet zo zwaar telt in China. Als het laatste is het potentieel van CO₂ opslag onbekend bij de auteur.

Rol van het Westen

Welke rol spelen wij in dit proces? Op de eerste plaats moet het westen het goede voorbeeld geven. De Chinezen hebben gelijk dat emissie reductie in eerste instantie een probleem is voor ons. Wij moeten onze zaakjes de komende decennia dus goed voor elkaar krijgen en in eerste instantie voldoen aan de eisen die Kyoto ons oplegt. Daarna moet ons doel zijn om in 2050 onze reducties met 50% te reduceren.

China wordt waarschijnlijk in 2020 al de grootste producent van CO₂ op de wereld, en ander ontwikkelingslanden als India en landen in Latijns Amerika volgen snel. Het is ook onze verantwoordelijkheid dat deze landen toegang krijgen tot efficiënte technologieën die wij ontwikkeld hebben en de komende decennia gaan ontwikkelen. Technologie transfer ligt dus ook op ons bordje.

Uiteindelijk is China natuurlijk zelf verantwoordelijk voor de reductie van binnenlandse emissies. Het lijkt erop dat ze dat zo langzamerhand gaan begrijpen. Het Westen kan dan optreden als adviseur voor de grootste economie van de tweede helft van de 21^e eeuw.

Omgekeerd is het ook waar dat als landen als China niet op korte termijn serieus aan de slag gaan met effectieve emissiereductie maatregelen, de geïndustrialiseerde landen er ook de brui aan gaan geven. Één van de belangrijkste redenen waarom de Amerikanen het Kyoto verdrag niet wilden ratificeren is dat zij het “onrechtvaardig” vinden dat ontwikkelingslanden geen emissie reducties hoeven te bewerkstelligen, terwijl zij dat wel zouden moeten. Een serieuze poging van China om een efficiënte energie huishouding op te zetten kan dus ook grote voordelen hebben voor de internationale klimaatpolitiek.

7 Eindconclusies van de werkgroep

Inleiding

In dit rapport is een analyse gemaakt van de haalbaarheid van verschillende energieopties om de problemen van klimaatverandering, voorzieningszekerheid en voor arme landen en opkomende economieën toegang tot energie het hoofd te bieden. In het verleden is schaarste van grondstoffen de reden van vele oorlogen geweest. Dit rapport moet de PvdA en de overheid aanzetten tot beter plannen en doorddenken van de lange termijn energievoorzieningszekerheid. Volgens de auteurs moeten ook toegang tot energie en klimaatverandering hoger op de agenda van de Partij van de Arbeid staan, aangezien ze direct raken aan begrippen en beginselen als solidariteit, economische vooruitgang en kansen voor de volgende generaties om zich duurzaam te ontwikkelen. Doel van dit rapport is een fysieke onderbouwing van het energiebeleid van de PvdA. We zijn uitgegaan van bekende scenario's maar zouden de toekomst graag veranderen en het anders doen.

De problemen met klimaatverandering en voorzieningszekerheid hangen grotendeels samen met de dominante rol van fossiele brandstoffen in onze energiemix. Fossiele brandstoffen hebben als voordeel dat ze goedkoop zijn: meer gebruik van fossiele brandstoffen leidt in ontwikkelingslanden vaak juist weer tot vermindering van armoede, omdat dat (zeker op de korte termijn) goedkoper is. Dit vergroot voor de geïndustrialiseerde landen de urgentie om het gebruik van fossiele brandstoffen te verminderen.

De eerste en voornaamste conclusie is dat geen enkele energieoptie op zichzelf de dominante rol van fossiele brandstoffen volledig kan overnemen en daarmee dus ook op zichzelf geen volledige oplossing voor de problemen kan leveren. Het rapport toont aan dat een toekomstige duurzame energiehuishouding moet bestaan uit een mix van opties. De samenstelling van deze mix zal gedictieerd worden door de diversiteit van de problematiek, de specifieke karakteristieken van de energieopties en de behoeften van de gebruikers.

Methodologie

Om een realistische inschatting te maken van de mogelijkheden om de problemen op te lossen, moet de stap van technisch potentieel naar economisch potentieel worden gemaakt. De groep heeft dit geprobeerd door de volgende middelen:

- Voor economische potentiëlen zijn de getallen genomen van organisaties die belang hebben bij de implementatie van de energieoptie. De redenering hierachter is dat geen conservatieve inschattingen zijn, maar aan de optimistische kant;
- De denkmethode van dit rapport gaat niet uit van enorme sprongen - bijvoorbeeld tegen hoge kosten een fabriek te bouwen om de vraag en daarmee de kostendaling aan te wakkeren.

Door middel van het toekennen van een waardering aan verschillende aspecten van energieopties kan er toch - zoveel mogelijk op basis van de huidige wetenschappelijke gegevens - een globale prioriteitstelling worden afgeleid.

Waardeoordelen zijn echter onvermijdelijk, aangezien de samenleving voor een wenselijke optie meer geld over heeft (en de optie daardoor economisch haalbaarder kan zijn) ook al is hij duur. Bij het vaststellen van de prioriteitenlijst zijn aannames gedaan over haalbaarheid in relatie met wenselijkheid van een energieoptie. Op basis van de prioriteitenlijst zou beleid moeten worden gemaakt.

Het in de hand houden van de menselijke invloed op het klimaat noopt tot een stabilisatie van de CO₂-concentratie in de atmosfeer tot 550 ppmv aan het einde van deze eeuw. Dit is het dubbele van de concentratie in 1780. Om dit te bereiken, mogen aan het eind van deze eeuw de mondiale emissies nog maar 25-50% van het niveau in 1990 bedragen, terwijl het totale energiegebruik op aarde naar verwachting een factor 3 tot 4 zal stijgen, bij ongewijzigd beleid.

Achtereenvolgens zijn opties voor energiebesparing, hernieuwbare energiebronnen en schone energiedragers, alternatief gebruik van fossiele brandstoffen en nucleaire opties bekeken.

Een synthese van deze opties en een eenvoudig scenario van de resultaten wordt vervolgens ook gegeven. Het scenario is gebaseerd op het technisch potentieel van de opties, waarbij impliciet of expliciet aannames over de maximaal aanvaardbare kosten zijn gedaan. Die zijn gebaseerd op de prijs die voor energie in relatie met economische ontwikkeling kan worden betaald. De aannames over implementatiesnelheid zijn gebaseerd op de inschattingen van technologiebelangenorganisaties, zoals bijvoorbeeld de Europese Associatie van Zonne-energie producenten. Deze inschattingen zijn in het algemeen aan de optimistische kant. Er is geen rekening gehouden met onvoorziene energieopties, verrassingstechnologieën en plotselinge enorme investeringen³²³. Verder is de analyse gebaseerd op de waardering die aan belangrijke gerelateerde gebieden gegeven is in de vorm van een soort "consumentengidstabel" met plusjes en minnetjes.

Er kan worden geconcludeerd dat Nederland in de toekomst moeilijk zelfvoorzienend kan zijn in termen van energie (dat is het nu ook niet) maar dat in de EU, gegeven de verwachte ontwikkelingen, de voorzieningszekerheid van energie niet in gevaar hoeft te komen, mits alle zeilen worden bijgezet in het verwezenlijken van de hieronder besproken opties.

De voorzieningszekerheid komt ook niet in gevaar als er geen olie of gas meer zijn en als er sterk moet worden gereduceerd in de broeikasgasuitstoot.

³²³ Een voorbeeld hiervan is een rapport van KPMG in opdracht van Greenpeace, waarin wordt berekend dat een investering in een fabriek die 500 MW aan zon per jaar produceert de kosten van zon vrijwel onmiddellijk met een factor 7 kan laten dalen. Het feit dat dit niet gebeurt, en het gebrek aan interesse bij investeerders, ook niet onder gunstige omstandigheden zoals in een energiearm land als Japan, zet vraagtekens bij het realiteitsgehalte van zulk een optie. Zie hoofdstuk 6.1 'zon op het dak' voor een bespreking van het rapport met referentie.

Energiebesparing (hoofdstuk 2)

Energiebesparing (reductie van energiegebruik aan de vraagkant) heeft een hoog potentieel voor het reduceren van energieverbruik. Energiebesparing wordt als zeer wenselijk beschouwd in de analyse omdat het zowel voor de voorzieningszekerheid (de lange termijn beschikbaarheid van energie) als voor het reduceren van de CO₂-uitstoot een voordelige optie is. Energiebesparing kan plaatshebben in huishoudens (minder of zuiniger apparaten bijvoorbeeld), in de industrie (energie-efficiëntere processen) of in de woning- en kantoorbouw ("nul-energiewoningen"). De uiteindelijke kosten zijn vaak laag of kunnen zelfs binnen enkele jaren worden terugverdiend door de energieconsument. Echter, de investeringen die moeten worden gedaan zijn vaak relatief hoog en moeten bovendien niet in alle gevallen worden gedaan door degene die aan de besparing verdient. Er zijn zelfs situaties waarin niemand direct baat heeft bij besparing. Er is in het algemeen een gebrek aan bewustzijn over de kostenbesparingen die als gevolg van een lagere energierekening kunnen worden gehaald.

Het consumentengedrag in Nederland lijkt meer in de richting van een groter energieverbruik te gaan dan in de richting van energiebesparing. In de analyse wordt uitgegaan van een maximaal haalbare energiebesparing en efficiencyverhoging van ca. 20% bij gestaag stijgende welvaart en bepaalde - enigszins beperkte - kostenveronderstellingen. Aangezien vrijwillige gedragsverandering niet lijkt te gebeuren, zouden verdere besparingen mogelijk kunnen zijn door financieel afgedwongen gedragsverandering.

Hernieuwbare energie (hoofdstuk 3)

Hernieuwbare energie wordt opgewekt uit energiebronnen die niet opraken. In dit rapport zijn de opties windenergie, zonnewarmte, zonne-elektriciteit, bio-energie, waterkracht en geothermische energie en hun potentieel behandeld. Deze opties kunnen worden gebruikt voor verwarming, transport, elektriciteit, of in de industrie. De bijdrage van duurzame energie in EU-15 is nog beperkt. Zo'n 5.6% van de primaire energie wordt opgewekt met duurzame bronnen. Daarvan nemen waterkracht en bijstook van bioafval het leeuwendeel in. Het groeipotentieel van deze twee is in Europa echter beperkt.

Veel hernieuwbare energieopties zijn afhankelijk van weersomstandigheden. Om te zorgen dat er toch altijd voldoende energie beschikbaar is, is opslag van energie noodzakelijk. Een manier daarvoor is het produceren van waterstof, dat vervolgens kan worden gebruikt als brandstof. Waterstof komt dus ook aan de orde. Een andere manier van opslag kan gerealiseerd worden met het omhoog pompen van water in waterreservoirs en het daarmee aandrijven van een waterkrachtcentrale.

Windenergie (hoofdstuk 3.1)

Het huidige aandeel van windenergie in EU-15 is 2% van de totale elektriciteitsconsumptie, met enkele uitschieters naar boven toe zoals Denemarken met 18.5%, Spanje met 5.5% en Duitsland met 4% van de nationale

elektriciteitsconsumptie. Gezien deze nationale uitschieters kan windenergie in de EU-15 nog fors groeien. Echter, omdat windenergie sterk weersafhankelijk is, is opslagcapaciteit om fluctuaties op te vangen nodig. Nadelen van windenergie zijn de horizonvervuiling en de daarmee samenhangende gebrekkige publieke acceptatie. Op basis van de grondbeschikbaarheid en minimale windsnelheden kan in Nederland hoogstens 3 GW worden geplaatst. Het potentieel van wind op zee is hoger dan dat op land, maar in de EU-15 is er meer potentieel op land.

De kosten voor windenergie zijn voorlopig nog significant hoger dan die van elektriciteit uit fossiele bronnen, en windenergie (vooral op zee) wordt nu nog fors gesubsidieerd. Windenergie op land wordt snel goedkoper en kan in sommige windrijke gebieden al concurreren met conventionele elektriciteitsprijzen.

Zonnewarmte (hoofdstuk 3.2)

Zonnewarmte kan eenvoudig worden ingezet voor warmwater voorziening, zowel huishoudelijk als in de verzorgingssector en industrie. Hiervan kan technisch, en in de meeste gevallen ook tegen lage kosten, ca. 50% worden gedekt met zonnewarmte. Dit komt overeen met ca. 5% van het totale Nederlandse energieverbruik met relatief eenvoudige, beschikbare technologie. In warmere landen kan het potentieel nog groter zijn. Daar wordt zonnewarmte overigens al veel vaker ingezet dan in West Europa. Toepassingen van zonnewarmte voor koeling zullen in de komende jaren sterk toenemen. De opbrengst van zonnewarmte varieert in Nederland wel sterk met de seizoenen. Korte termijn wisselingen kunnen goed worden opgevangen met technische voorzieningen.

Zonne-elektriciteit (hoofdstuk 3.3)

Bij foto-voltaïsche energie (PV) wordt de energie in zonlicht omgezet in elektriciteit door een zonnecel, gemaakt van bijvoorbeeld silicium of organische materialen. Op dit moment voorziet zonne-elektriciteit slechts in een fractie van het totale mondiale en ook Europese energieverbruik. Het is nog erg duur; de grootschalige productie in PV-parken kost ongeveer 30 keer zoveel als conventionele grootschalige elektriciteitsproductie. Voor kleinschaliger toepassingen zoals PV op het dak is het kostenverschil met de consumentenprijs veel kleiner. Ook zijn er toepassingen in afgelegen gebieden in ontwikkelingslanden waarbij zonne-elektriciteit concurrerend kan zijn.

Bij een sterke kostenreductie van zonnecellen zou PV in 2020 voor 1% (zie tabel 3.3.3: 23000 TWh) van de mondiale primaire energievoorziening kunnen zorgen. Op de lange termijn kan dat aandeel stijgen, maar daarvoor is verdere kostenreductie wel noodzakelijk. Deze reductie kan bewerkstelligd worden door massaproductie en zware subsidie van bestaande type cellen; verwacht wordt dat dit tegen de helft van deze eeuw zal leiden tot zonnecellen die kunnen concurreren met andere hernieuwbare energieopties. Overigens hangt dit af van investeringen in onderzoek en ontwikkeling, maar ook van externe ontwikkelingen zoals de olieprijs.

Onderzoek naar nieuwe types cellen kan ook een bijdrage leveren. Hierbij wordt bijvoorbeeld gedacht aan organische zonnecellen die het fotosyntheseproces van planten simuleren. Om kostenverlaging te bereiken op de middellange en lange termijn is daarom veel onderzoeksgeld nodig. Ruimtebeslag en de lange energie-terugverdientijd (nu ca. 4 jaar) van zonnecellen zijn punten van aandacht, alhoewel zon qua energieopbrengst per vierkante meter efficiënter is dan windenergie of biomassa.

Waterkracht (hoofdstuk 3.4)

Waterkracht is op dit moment wereldwijd de meest ingezette hernieuwbare energiebron, is goed toepasbaar en is commercieel haalbaar. De inzet kan op korte termijn vergroot worden, maar er zijn ook beperkingen. In de EU-15 kan de totale capaciteit met hoogstens een factor 2 stijgen; wereldwijd wordt een factor 3 economisch haalbaar geacht rond 2020. Op langere termijn kan een factor 6 technisch mogelijk zijn, maar hierbij moeten bepaalde nadelen voor lief worden genomen. Soms heeft grootschalige inzet van waterkracht namelijk onaanvaardbare negatieve gevolgen voor mens en milieu. Bij de planning moet daaraan aandacht worden geschonken. In de analyse is een factor 3 aangenomen.

Bio-energie (hoofdstuk 3.5)

Het potentieel voor bio-energie is wereldwijd erg groot, maar concurreert met andere zaken zoals voedselvoorziening, stedelijk gebied en natuur, die ook veel landoppervlak nodig hebben. Nederland is zo volgepland dat er weinig ruimte voor teelt van energiegewassen over is. Import van biobrandstoffen kan een oplossing bieden. Het grote voordeel van biomassa is dat het een flexibele bron is: het is meteen een energiedrager die kan worden opgeslagen, soms in ruwe vorm, soms omgewerkt tot vloeistoffen als alcohol. Het kan worden ingezet voor transport, en worden bijgemengd bij fossiele brandstoffen. Aandachtspunt zijn de emissies van andere vervuilende stoffen zoals stikstof en zware metalen; die worden nu nogal eens voor lief genomen.

Verder moet de biomassa duurzaam worden verbouwd om duurzame energie op te leveren. Met planttechnologie kan waarschijnlijk nog wel wat gewonnen worden aan opbrengst maar de grootste winst zal zitten in verbetering van de omzetprocessen van biomassa in energie. Biomassa kent ook haalbare decentrale toepassingen, maar heeft nog wel subsidie om te kunnen concurreren met fossiele brandstoffen.

Aardwarmte (hoofdstuk 3.6)

Aardwarmte is vooral geschikt als bron van warm water voor verwarming van woningen en gebouwen. Voor verwarming is het potentieel aanzienlijk. Voor de elektriciteitsvoorziening in Europa kan aardwarmte een interessante, maar beperkte

bijdrage leveren. Het is eenvoudige technologie, wordt al op veel plekken ingezet en levert geen horizonvervuiling of andere nadelen.

Waterstof (hoofdstuk 3.7)

Alleen op de zon is waterstof een energiebron. Op aarde is waterstof is geen energiebron maar een schone energiedrager. Het moet schoon geproduceerd worden om op een echt duurzame manier ingezet te worden. De goedkoopste manier om CO₂-arme waterstof te produceren is op dit moment met fossiele brandstoffen gecombineerd met CO₂-opslag. Vergassing van biomassa is een hernieuwbare energiebron voor waterstof en ligt qua kosten niet ver verwijderd van waterstof uit fossiele brandstoffen met CO₂-opslag. Dure opties zijn op dit moment omzetting van elektriciteit uit zon of wind in waterstof (ongeveer 10-30 keer duurder afhankelijk van de duurzame elektriciteitsbron).

De waterstof moet in een brandstofcel worden omgezet in energie. Brandstofcellen zijn nu al efficiënter dan benzinemotoren, en er wordt nog gewerkt aan verbetering van die efficiëntie, maar ze zijn nog te duur om op grote schaal ingezet te worden.

Aandachtspunten van waterstof zijn de lage energie per volume, wat het onpraktisch maakt voor gebruik in auto's, en het explosiegevaar, alhoewel dat door experts niet als groter wordt ingeschat dan bij bijvoorbeeld LPG. Al met al kan waterstof een rol van betekenis spelen in de transportsector, en bij energieopslag van intermitterende energiebronnen zoals wind en zon als het elektrolyseproces drastisch goedkoper kan worden en de prijs van brandstofcellen naar beneden gaat.

Schoon fossiel (hoofdstuk 4.1)

Er is veel winst te behalen door oude kolen- en gascentrales te vervangen door nieuwere technologie. Emissiefactoren (in tonnen CO₂ per kWh geproduceerde elektriciteit) zijn in Nederland de afgelopen jaren al met de helft afgenomen. Er kan ook CO₂ winst worden geboekt door over te schakelen van kolen naar gas. Het potentieel is aanzienlijk, vooral in landen in Oost Europa en in ontwikkelingslanden.

Opslag van CO₂ (hoofdstuk 4.2)

Afvang en opslag van CO₂ heeft een groot potentieel. In de nu bekende reservoirs kan naar schatting 50 % van de mondiale uitstoot aan CO₂ tot 2050 worden opgeslagen. CO₂-afvang en -opslag is alleen van belang voor grote puntbronnen zoals de chemische industrie en elektriciteitscentrales. In principe legitimeert CO₂-opslag verder gebruik van kolen voor elektriciteitsproductie. In die zin verlengt CO₂-opslag het fossiele brandstof tijdperk. De goedkoopste manier om waterstof te maken is op dit moment door gebruik van fossiele brandstoffen in combinatie met CO₂-opslag. CO₂-opslag kan dus de waterstofeconomie eerder mogelijk maken dan wanneer alleen hernieuwbare bronnen beschikbaar zouden zijn voor CO₂-vrije

productie. Indirect kan CO₂-opslag dus een rol spelen in de anderszins moeilijk CO₂-vrij te krijgen transportsector.

Omdat CO₂-opslag geen duurzame oplossing is voor de klimaatproblematiek, mag het de implementatie van hernieuwbare bronnen niet vertragen. Het lijkt onwaarschijnlijk dat CO₂-opslag tot gevaarlijke situaties leidt, maar de exacte risico's van CO₂-opslag zijn nog onbekend en de voorwaarde voor implementatie is dat een risicoanalyse wordt uitgevoerd. Ontsnapping met gezondheids-gevolgen is niet ondenkbaar. Bovendien is het onvermijdelijk dat volgende generaties op moeten letten dat het opgeslagen CO₂ niet vrijkomt. Hoe het publiek met de optie omgaat, hoe de wetgeving zich ontwikkelt en de integriteit van de reservoirs bepalen in sterke mate de implementeerbaarheid van deze optie.

Kernsplijting (hoofdstuk 5.1)

Kernsplijting wordt over de hele wereld op grote schaal toegepast, en levert CO₂-arme en relatief goedkope stroom. Het heeft echter ook grote nadelen. Reactorveiligheid wordt ervaren als een probleem, maar er wordt gewerkt aan reactoren die op basis van fysische principes inherent veilig zijn (dat wil zeggen: uit zichzelf afslaan als er iets mis is). Het proliferatierisico, dat eruit voortkomt dat grondstoffen voor kernsplijting ook kunnen worden gebruikt voor het maken van kernwapens waardoor het risico bestaat dat met nog wijdere verbreiding van de optie deze grondstoffen in de verkeerde handen komen, is moeilijk oplosbaar. Controles zijn de enige middelen die kunnen helpen maar zijn per definitie niet waterdicht. Welk risico hier aanvaardbaar is, hangt van vele factoren af.

Ook het probleem van kernafval, dat nog duizenden jaren gevaarlijk kan blijven, is slechts gedeeltelijk oplosbaar. Toepassing van nieuwe technologie zou in de toekomst de stralingstijd van het meeste (maar niet al het) kernafval kunnen reduceren tot een paar honderd jaar, maar indien als criterium wordt gehanteerd dat die tijd tot bijvoorbeeld één generatie moet worden gereduceerd, is de optie per definitie niet inzetbaar. **De aanvaardbaarheid van kernsplijting als een mogelijke optie voor de energievoorziening zal onderwerp moeten zijn van een brede discussie in de PvdA en de sociaal-democratische fractie in het Europees Parlement.** De uiteindelijke implementatie van kernenergie in de toekomst hangt sterk af van de publieke en politieke acceptatie van toekomstige technologische ontwikkelingen op de gebieden van inherent veilige centrales, reductie van het proliferatierisico en levensduurverkorting van radioactief afval.

Kernfusie (hoofdstuk 5.2)

De werkzaamheid en praktische implementeerbaarheid van kernfusie zijn nog niet experimenteel aangetoond. Het uitproberen van proefreactoren in de komende decennia zou moeten aantonen dat een commercieel beschikbare kernfusiecentrale over 40 jaar kan werken. Indien de experimenten slagen, is kernfusie een grootschalig inzetbare optie op de zeer lange termijn, praktisch zonder de nadelen

van kernsplijting en kan het een fors deel van de centrale energievoorziening op een niet-milieubelastende en CO₂-vrije manier dragen. Kernfusie is per definitie grootschalig en kapitaalintensief.

Evaluerend... (hoofdstuk 6)

De potentiëlen van de energieopties die hierboven worden genoemd zijn samengevat met behulp van twee eenvoudige analyses voor de EU-15.

Twee scenario's zijn beschreven voor EU-15³²⁴ in de 21e eeuw: 'alle zeilen bijzetten' en 'gekissebis'³²⁵. In het eerste scenario worden alle fossiele efficiencyverbeteringen die tegen redelijke kosten mogelijk zijn doorgevoerd en alle technisch en economisch haalbare hernieuwbare bronnen geïmplementeerd. In het 'gekissebis' scenario worden ook alle fossiele efficiencyverbeteringen benut, maar wordt slechts de helft van de hernieuwbare mogelijkheden gerealiseerd. Deze scenario's zijn semi-kwantitatief en hebben vooral als doel de politieke keuzes te verduidelijken.

Uit de berekening van het "alle zeilen bijzetten" scenario volgt dat het mogelijk is om in 2050 en 2100 de CO₂ doelstellingen te halen met de inzet van duurzame bronnen, aannemende dat de EU-15 10% van de wereldwijd beschikbare biomassa kan importeren voor de energievoorziening (er wordt nu overigens meer aan olie geïmporteerd). Kernsplijting kan in dit scenario achterwege blijven.

In het "gekissebis" scenario is inzet van 10 % van de wereldwijde biomassa met de huidige teeltefficiëncy niet voldoende om het 'gat' in de energievoorziening te dekken. Omdat men er niet van uit mag gaan, dat het haalbaar is grote verbeteringen in efficiëncy van bio-energie teelt door te voeren of dat de prijs van zonne-elektriciteit zich gunstig ontwikkelt, ontstaat er een probleem. In de EU-15 is in dit geval meer CO₂-opslag nodig en wellicht ook kernsplijting. Als het echter zo is dat PV snel goedkoper wordt of de bioteelt efficiënter kan, dan is kernsplijting ook in dit gekissebis-scenario niet nodig.

In de evaluatie is rekening gehouden met voorzieningszekerheid, een stijging van de Europese energievraag van (slechts) 50%, en import van biomassa en elektriciteit, maar niet met de toegang tot energie in ontwikkelingslanden. Dat is een ander, belangrijk, aandachtspunt. Mondiaal, en vooral in de zich ontwikkelende landen China en India, zal de vraag naar energie veel sterker stijgen dan in de EU-15 - zelfs met een factor zes volgens een "Business As Usual" scenario. Opmerkelijk is dat deze sterke stijging plaats zal vinden in een wereld waarin energiearmoede nog steeds een prangend vraagstuk blijft. De verwachting is dat het aantal mensen zonder toegang tot moderne energievoorziening de komende decennia niet zal dalen en zal blijven steken op 1.5 miljard mensen. Aangezien hierin alleen beleidsmatig

³²⁴ De recente toetreding van de 10 nieuwe lidstaten tot de EU lijkt hierbij genegeerd te zijn. Echter, aangezien de problemen voor de energievoorziening en de restricties voor het duurzaam energiepotentieel vooral voor de EU-15 gelden, en de databeschikbaarheid voor de EU-25 nog beperkt was, gaat de analyse alleen over de oude EU.

³²⁵ Er bestond in de groep geen overeenstemming over de keuzes voor de scenario's. Enkele leden vonden met name de potentiëlen voor energiebesparing en -efficiëntie, zonne-elektriciteit en windenergie te pessimistisch. Volgens deze leden zal het dus gemakkelijker zijn om een volledig duurzame energievoorziening te halen dan in deze scenario's is aangegeven.

door Europa een rol te spelen is en het niet of nauwelijks samenhangt met de evaluatie van de Europese energievoorziening, is het niet meegenomen in bovenstaande analyse.

De groep heeft ook geprobeerd de voor- en nadelen van de diverse energieopties kwantitatief te wegen aan de hand van een aantal aspecten, en die vervolgens gebruikt in een wiskundig optimalisatieprogramma. Dat programma is afhankelijk van de gegevens die erin worden gestopt en die volgen uit de bovenstaande analyse. Het blijkt dat de optimale mix van 14 opties die de gewogen som van scores voor de 17 indicaties uit de vorige hoofdstukken maal de inzet maximaliseert, slechts marginaal afhangt van de gewichten. Milieubewuste gewichten bleken zelfs te leiden tot meer inzet van kernsplijting dan milieuonverschillige gewichten. De oorzaak hiervan is dat de levensduur van het afval niet is meegenomen bij de evaluaties in de eerdere hoofdstukken. Ook is er geen onderlinge afweging van de gewichten gedaan.

Conclusies en prioriteiten

De voordelen en nadelen van de energieopties zijn niet altijd hetzelfde. Er zijn bijvoorbeeld vele vormen van het gebruik van biomassa voor de energievoorziening die onderling sterk verschillen in duurzaamheid en betaalbaarheid. Op basis van de analyse is een globale prioriteitenvolgorde opgesteld, die echter expliciet binnen de grenzen van implementeerbaarheid, wenselijkheid, acceptatie en kosten moet worden gezien. Energieopties die moeilijk omkeerbare gevolgen hebben voor volgende generaties (bijvoorbeeld kernsplijting en CO₂-opslag, maar ook klimaatverandering zelf) scoren lager dan opties die geen onomkeerbare veranderingen in het systeem aarde opleveren voor de komende generaties.

De prioriteitsvolgorde is:

- 1) Besparing/verbetering van efficiëntie
- 2) Hernieuwbare energiebronnen
- 3) Schoon fossiel, inclusief CO₂ opslag
- 4) Kernsplijting

Als kernfusie blijkt te werken tegen redelijke prijzen en met beperkte milieugevolgen, zal deze vorm van energieopwekking samen met de hernieuwbare bronnen op de tweede plaats komen. De analyse van de werkgroep laat zien dat, hoe graag we het ook willen, we er niet vanuit mogen gaan dat 1) en 2) onze problemen gaan oplossen. Het gaat niet vanzelf om uit die opties het meeste te halen. We kunnen wel een heel eind komen met royale import van biomassa en inzet met alle kracht op wind en verbetering van PV. CO₂-opslag zou nodig zijn om de voorzieningszekerheid in de EU-15 te behouden en klimaatverandering te matigen.

De werkgroep "Energieopties" pleit er expliciet voor om niet weg te kijken voor de energieproblematiek. We moeten durven kiezen voor echte en verantwoorde oplossingen. Dit heeft als consequentie dat er veel moet worden geïnvesteerd: in

technologie, maar ook in bewustwording en verinnerlijking van energieoverwegingen in andere beleidsterreinen. Tenslotte moet ook het grote publiek zich bewust worden van de gevolgen van hun energiegebruik voor de rest van de wereld. Als niet alle zeilen worden bijgezet, kan niet worden uitgesloten dat zelfs de laatste optie in de prioriteitenvolgorde, kernsplijting, moeten worden ingezet. Om dit te voorkomen is gericht beleid nodig op zowel onderzoek en ontwikkeling als op implementatie van energieopties.

“Weglopen voor het probleem is geen optie.”

Werkgroep energieopties, juni 2004

Personalia van de leden van de werkgroep energie-opties 2003/2004

Marc Beurskens (1970), mbeursk@freeler.nl, studeerde technische natuurkunde aan de TUE, promoveerde op kernfusie (1999), werkte aan JET, het grootste kernfusie-experiment ter wereld en is thans als wetenschapsvoorlichter kernfusie verbonden aan het FOM Instituut voor Plasmafysica, Rijnhuizen, Nieuwegein.

Egbert Boeker (1937), egbertb@xs4all.nl, studeerde theoretische natuurkunde aan de VU, promoveerde op een kernfysisch onderwerp (1963), was hoogleraar theoretische natuurkunde en later in het bijzonder voor de natuurkunde van het milieu aan de VU, co-publiceerde twee leerboeken 'Environmental Physics'.

Teun Bokhoven (1955), teunbokhoven@cs.com, studeerde civiele techniek en vervolgens bedrijfskunde in Amerika, is betrokken bij verschillende ondernemingen op het gebied van duurzame energie binnen Europa en is voorzitter van de DE Koepel (koepel organisatie van de Duurzame energie sector in Nederland)

Hendrik-Jan Bosch (1972), hjbosch@xs4all.nl, studeerde aardwetenschappen aan de UU, en is thans energie coördinator van de Gemeente Rotterdam

Heleen de Coninck (1977), deconinck@ecm.nl, studeerde scheikunde en natuurwetenschappelijke milieukunde aan de KUN, werkte bij het Max Planck Instituut voor Chemie in Mainz en werkt thans bij het Energieonderzoek Centrum Nederland aan internationaal klimaatbeleid, onder andere met betrekking tot ontwikkelingslanden.

Nic Frederiks (1946), n.frederiks@wxs.nl, studeerde werktuigbouwkunde aan de HTS Amsterdam, werkte bij TM adviseurs en de gemeentes Diemen en Hilversum en is thans senior beleidsadviseur van de gemeente Amsterdam en themamanager Milieu en Duurzaamheid van de Zuidas. Hij is bestuurslid van de LME, de landelijke werkgroep Milieu en Energie van de PvdA.

Annemarie Goedmakers (1948), annemarie.goedmakers@fres.nl, studeerde biochemie aan de UvA, promoveerde op een aquatisch ecologisch onderzoek, was hoofd van een afdeling bij CRM/WVC, lid van het Europees Parlement voor de PvdA, werkte als directeur duurzame energie bij NUON, en is thans voorzitter van de Stichting Rural Energy Services. Zij distantieert zich van het eindrapport omdat het, volgens haar, te veel uitgaat van de bestaande technologische en economische situatie en zij een aantal keuzes uit het rapport niet kan delen.

Anton Jansen (1958), anton@jansen-vandepol.nl, studeerde politieke wetenschappen en post doctoraal bestuurskunde aan de UvA, werkt de laatste 15 jaar op het gebied van Europese en Nederlandse public affairs en strategische politieke communicatie, is senior partner van een public affairs consultancy.

Peter Löhnberg (1938), p.lohnberg@misc.utwente.nl, studeerde elektrotechniek aan de TUD, promoveerde op biomedische signaalverwerking, werkte tot zijn pensionering als UD systeemidentificatie en adaptieve regeltechniek aan de UT.

Marco Mensink (1968), miranda.marco@wxs.nl, studeerde bosbouw en bedrijfskunde aan de LU-Wageningen. Heeft ruim 6 jaar gewerkt als milieuconsultant bij Moret, Ernst & Young en is thans werkzaam als branche secretaris bij de Koninklijke Vereniging van Nederlandse Papier- en Kartonfabrieken, belast met milieu en energiezaken.

Bert Ritter (1961), H.A.T.ritter@inter.nl.net, studeerde werktuigbouwkunde aan de TUE, werkzaam in chemie en industrietechniek, sinds 1999 bij Senter-Novem als projectadviseur voor de regeling energie-investeringsaftrek en carbon-credits.

Rokus Wijbrans (1967), ra.energy.consulting@hetnet.nl, studeerde technische natuurkunde aan de UT, was verantwoordelijk voor het programma Duurzame Energie van Gastec, en heeft thans zijn eigen adviesbureau op gebied van energie en milieu.