Energie revolutie

Oplossingen voor eindige voorraden, politieke afhankelijkheid en klimaatverandering

Jos Wassink

Uitgeverij Veen Magazines B.V.
Postbus 256
1110 AG Diemen
www.veenmagazines.nl

Titel: Energierevolutie. Oplossingen voor eindige voorraden, politieke afhankelijkheid en klimaatverandering
Auteur: Jos Wassink
Tekstredactie:
Ontwerp en opmaak: Crisja Ran GO, Amsterdam
Binnezijde cover: SmartGrids – Tekening Dr. Manuel Sánchez Jiménez voor Europese Commissie directoraat onderzoek
Druk: Koninklijke Wöhrmann, Zupthen

© Veen Magazines, Diemen 2007
ISBN: 978 90857 11 131
NUR: 961

Blijf op de hoogte via energierevolutie.net

Niets van deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced in any form, by print, photocopy, microfilm, or any other means without written permission by the publisher.

Mixed Sources
Productgroep uit goed beheerde bossen, gecontroleerde bronnen en gerecycled materiaal.
www.fsc.org Cert no. CU-COC-802528
© 1996 Forest Stewardship Council

FSC papier is papier dat het keurmerk van de Forest Stewardship Counsil (FSC) mag dragen. Voor dit boek is het FSC-gecertificeerde Munkenprint gebruikt. Bij dit papier is het zeker dat de productie niet tot bosvernietiging heeft geleid. Een flink deel van de grondstof is afkomstig uit bossen en plantages die worden beheerd volgens de regels van het FSC. Van het andere deel van de grondstof is vastgesteld dat hiervoor geen houtkap in de laatste resten waardevol oerbos (oorspronkelijke bos) heeft plaatsgevonden. Dit papier is 100% chloor- en zwavelvrij gebleekt en wordt geleverd door Artic Paper Munkedals AB, Zweden.

Energie revolutie

Oplossingen voor eindige voorraden, politieke afhankelijkheid en klimaatverandering

Jos Wassink

Uit zorg voor mijn kinderen

Mats en Imke

(*die 's ochtends een spoor van licht achterlaten door het huis*)

Inleiding

Dit boek is begonnen uit zorg en afgesloten in optimisme. Daartussen ligt een speurtocht naar de mogelijkheden om los te komen van fossiele brandstof.

Als wetenschapsjournalist kreeg ik al in een vroeg stadium allerlei berichten onder ogen over klimaatverandering. Over smeltende permafrost in Siberië, over gletsjers die met wit folie bedekt worden om ze tegen de zon te beschermen, en over de gevaren van smeltwaterrivieren op het landijs van Groenland. Maar ook uit eigen ervaring weten we inmiddels dat het klimaat verandert. In de zomer volgen de hittegolven elkaar op en in de februari volgt de lente op een langgerekte herfst. IJs in de sloten wordt iets van vroeger. Volgens het klimaatpanel IPCC van de Verenigde Naties is het 'zeer waarschijnlijk' dat de klimaatverandering het gevolg is van het gebruik van fossiele energie en de uitstoot van CO_2. Het wordt dus hoog tijd om het gebruik van fossiele brandstof zoals gas, olie en steenkool te verminderen.

Maar momenteel is Nederland voor minstens 95 procent afhankelijk van fossiele brandstof, voornamelijk aardgas. Is het denkbaar dat duurzame, schone of CO_2-vrije energie die nu nog maar 3 procent uitmaakt van het totaal, straks – halverwege de eeuw – het leeuwendeel van de energievoorziening verzorgt?

Dat was de vraag waarmee ik op zoek ging naar alle vormen van duurzame energie die ik maar kon vinden: windenergie, stroom uit mest of elektriciteit uit zout en zoet water. Niets was te gek. Ik wilde weten hoe het werkte, hoeveel het kostte en hoeveel het uiteindelijk op zou kunnen leveren.

In de loop van de tocht begon ik me af te vragen of het eigenlijk wel mogelijk is om een energievoorziening op te bouwen uit kleine wisselvallige bronnen, zoals windmolens, zonnepanelen en stroomleverende cv-ketels. Ik kwam erachter dat er mensen zijn die zich met die vraag bezighouden, zowel op wijkniveau als op het niveau van Europese hoofdstructuren. Ik begreep dat zonne-energie nu nog verwaarloosbaar is, maar dat daar grote verwachtingen aan gesteld worden. Ook ontdekte ik

dat de oplossingen voor een schone energievoorziening voor een groot deel al op de plank liggen. Maar tot nu toe was er weinig belangstelling voor omdat fossiele energie goedkoop was en het klimaatprobleem niet zo dringend leek.

Dat begint nu te veranderen. We hebben in 2005 orkaan Katrina gezien en in 2006 de tournee van Al Gore. Alternatieve energiebronnen komen sterk in de belangstelling. De wind- en zonne-energiesector groeit met dubbele cijfers. Er ligt een wereld aan mogelijkheden, dat stemt optimistisch. Het zal een hele klus worden om de verslaving aan olie, gas en kolen te overwinnen, maar de energierevolutie is begonnen.

Inhoud

Inleiding

I DE FUIK 9

Noodkreet uit Siberië 10
Verslaafd aan energie 14
De eeuw van de olie 20
Hubbert's Peak 31
Beren op 't behang 38
Kosten van het klimaat 47
Op de splitsing 61

II HET PALET 71

DE ZON ALS BRON
Energie zat 73
WATERSTOF
Waterstof op wielen 77
TERUG IN DE GROND
Een stripper in het lab 86
BIOMASSA
Gedetineerden douchen duurzaam 95
Groen gas 100
Stroom van de boer 104
Verzengende hitte 110
Plantaardig tanken 116
Moleculen rijgen 117
LEVEN VAN DE WIND
Windpark op zee 133

ZONNE-ENERGIE
Blauwe daken 143
Spiegels voor Afrika 153
KERNENERGIE
Eén of twee kerncentrales erbij 163
Een stralende erfenis 171
AARDWARMTE
Diepe warmte 183
STROOM UIT WATER
Eindeloze deining 192
Waterstroom 202
MEER MET MINDER
Drie keer langer op een liter 208
Stroom uit de combiketel 214
Warmte uit de kas 222
Rijtjeshuis in de duinen 228
Stroomloos in Castricum 234
POWER-MATCHING
Stroom verkopen doe je zo 240

III LAPPENDEKENS 248

Ingenieurs en activisten 249
Doe-het-zelf-scenario 256
Een zonnig vooruitzicht 260
Kan ik er wat aan doen? 267

Voetnoten 274
Begrippenlijst 280
Index 285
Literatuurlijst 294
Weblinks 296

DEEL I

De Fuik

'We mogen ons verheugen op een tijdperk met een gelijkmatiger en beter klimaat, zeker in de koudere streken op Aarde, tijden wanneer de Aarde veel meer overvloedige oogsten zal opleveren ten bate van een snel groeiende mensheid.'

De Zweedse klimaatpionier Svante Arrhenius verheugt zich in 1908 op de gevolgen van het broeikaseffect. Even later bedenkt hij met enige spijt dat het nog wel duizend jaar zal duren voordat het klimaat merkbaar verandert.

FIG.01 In 1958 begint Charles David Keeling op Hawaï met zijn metingen van de CO_2-concentratie in de lucht. Een halve eeuw later – de metingen gaan nog steeds door – zal zijn werk een belangrijke drijfveer zijn voor de energierevolutie. - Foto: Scripps Oceanography

Noodkreet uit Siberië

In de zomer van 2005 ontvangt journalist Fred Pearce van het Engelse wetenschapsblad *New Scientist* een merkwaardig mailtje. De afzender stelt zich voor als Sergei Kirpotin van de Universiteit van Tomsk, middenin Siberië. Kirpotin is net teruggekomen van een reis door West-Siberië en hij is zich rot geschrokken. Overal had hij meren gezien, soms wel honderd kilometer groot, waar drie jaar geleden nog veengebieden waren. Als ecoloog begreep Kirpotin wat hij zag: de permafrost onder het veen was gaan smelten en dat is slecht nieuws voor het klimaat. Niet alleen is de afsmeltende toendra een van de meest zichtbare gevolgen van het broeikaseffect, het kan de opwarming ook drastisch versnellen.

De smeltende toendra is een angstaanjagend voorbeeld van een versterkende terugkoppeling in het broeikaseffect. Door de opwarming begint een deel van de permafrost plaatselijk te smelten. Er vormt zich dan een donker meertje dat meer warmte opneemt dan eerder het veen. Het smelten versnelt daardoor en vanuit het meer borrelt methaangas (CH_4) op, een broeikasgas dat meer dan twintig keer sterker werkt dan kooldioxide (CO_2). Kirpotin realiseerde zich de ernst van wat hij zag en hij zocht een manier om in het Westen de noodklok te luiden. 'Het probleem is niet alleen wetenschappelijk,' schreef Kripotkin in zijn mail, 'het is een kwestie van wereldpolitiek. Als de mensheid grote economische en sociale schade wil voorkomen, dan moeten er snel maatregelen genomen worden. We hebben duidelijk steeds minder tijd om te handelen.' Een collega van hem aan de Universiteit van Oxford verwees hem naar Fred Pearce.

Pearce is een veteraan in de wetenschapsjournalistiek. Dunnig grijs haar, snorretje en een vierkante bril. Meestal draagt hij een licht overhemd zonder stropdas en als de gelegenheid erom vraagt trekt hij een tweedjasje aan. Een onopvallende verschijning, maar wel iemand met een lange staat van dienst bij het bekendste populair-wetenschappelijke tijdschrift en iemand met belangstelling voor ecologie en energieproblematiek. In zijn loopbaan heeft Pearce al heel wat Russische excentrieke-

lingen gezien die – zoals hij het beschrijft – te lang alleen op de toendra waren achtergelaten.

Maar Kirpotin, begrijpt Pearce al snel, is van een ander garnituur. Een jonge ecoloog met een leidinggevende functie aan de Universiteit van Tomsk. Bovendien zijn er andere aanwijzingen dat er iets verandert in het noorden. Een paar weken eerder namelijk had onderzoekster Katey Walter van de Universiteit van Alaska in Fairbanks op een lezing verteld over vreemde metingen in Oost-Siberië. Boven een stel meren had men met vanuit de satelliet vreemd hoge concentraties methaan gemeten. *Hotspots* werden ze genoemd, 'die alle voorgaande metingen ver overtroffen.' Een andere onderzoeker, Larry Smith van de Universiteit van Californië in Los Angeles, bevestigde de temperatuurstijging aan de grond in West-Siberië. Volgens Smith was het zelfs de snelst opwarmende plek ter wereld. Ieder jaar begon de lente vroeger en viel er meer regen waardoor het hele landschap een stuk natter was geworden.

Reden genoeg voor Pearce om Kirpotin op te zoeken. Pearce kent het gebied nog van vorige reizen naar afgelegen olievelden. Hij herinnert zich de eindeloze toendra, de olievlekken rond gebarsten pijpleidingen, de verlaten wegen met lege olievaten langs de kant, de in verval geraakte strafkampen en half aangelegde spoorwegen. Een janboel en een viespeukerij, maar wel op een hard bevroren bodem. Nog nooit had hij, wanneer hij uit de helikopter op het mos stapte, natte voeten gehaald. Dat is nu wel anders: onder zich ziet Pearce de kleine en grote meren waar Kirpotin over heeft geschreven. Ronde meren als gaten in de grond. 'Westerse wetenschappers kunnen zich de schaal van het probleem niet voorstellen,' aldus Kirpotin. In de helikopter begint Pearce zich te realiseren dat Kirpotin niet heeft overdreven.

Het turfveen in West-Siberië is met een miljoen vierkante kilometer zo groot als Frankrijk en Duitsland samen. De bovenlaag bestaat uit veen met daaronder metersdikke lagen bevroren turf. Het mos aan de oppervlakte neemt CO_2 op uit de lucht. Dat doet het al heel lang (sinds de laatse ijstijd die 10.000 jaar geleden ten einde liep) en op immense schaal. De kou voorkomt dat het veenmos ontbindt. In plaats daarvan zakt het weg in de ondergrond en vormt het een permanent bevroren laag turf. Het is een immens depot geworden van door planten vastgelegde CO_2. Men schat zelfs dat een kwart van het wereldwijd plantaardig gebonden CO_2 hier in de grond zit. De vrees is nu dat 's wereld grootste depot van CO_2 aan het veranderen is in 's werelds grootste CO_2-bron, die de menselijke emissies in de schaduw stelt. Erger nog, onder water

zullen de plantenresten gaan rotten waardoor de koolstof in de vorm van methaan (CH_4) vrijkomt, wat een veel sterker broeikasgas is dan kooldioxide.

FIG.02 Afsmeltende permafrost. Ook in Alaska smelt de toendra. Geoloog Michael Gooseff (Colorado School of Mines) bestudeert het afsmelten in de buurt van het Toolikmeer. Thermokarst, het ineenstorten van de voorheen harde bodem komt nu meer voor dan ooit tevoren. Men vermoedt vanwege de klimaatverandering. - Foto: Jim Bruggers, juli 2005.

Pearce's reis strandt op de luchthaven van Novy Urengoi waar, de autoriteiten hem ondanks zijn visum de toegang weigeren. De stad is privé-eigendom van de olie-industrie, licht een dame op de luchthaven toe, en zonder uitnodiging mag je er niet naar binnen. Pearce begint te begrijpen waarom de stad in het lokale dialect 'godverlaten oord' heet en keert onverrichter zake terug.

Hij ontdekt een andere mogelijkheid om de toendradooi te onderzoeken in Noord-Zweden en vertrekt daarheen. Bij Abisko is daar al sinds 1903 een meetstation gevestigd in een oud gebouw van de ijzermijnen. Wetenschappers bestuderen er het klimaat, de midzomernachten, de poolwinter, het ecologisch systeem en het noorderlicht. De recente opwarming is ook hier een bekend verschijnsel. De meren vriezen een maand later dicht dan twintig jaar geleden, vertelt men. Vroeger ontdooiden ze eind mei, maar dat is de laatste jaren een stuk eerder. Het is al een paar keer in begin mei geweest zodat het traditionale wakvistoernooi geen doorgang kon vinden. In het nabijgelegen Stordalen bevestigt de Deense biochemicus Torben Christensen ook de uitstoot van

methaan. Christensen heeft de beschikking over een zeer geavanceerde snuffelpaal die de windrichting en windsnelheid meet en tegelijkertijd met lasers de langskomende moleculen analyseert. Hiermee heeft hij vast kunnen stellen dat er een groeiende gasstroom uit de veenbodem vrijkomt: momenteel 6 milligram per vierkante meter per uur. Dat klinkt gering, maar vermenigvuldig het met het oppervlak en je hoort een tijdbom tikken.

De schatting is dat de huidige methaanuitstoot uit de ontdooiende turf 50 miljoen ton per jaar bedraagt. Dat staat gelijk aan het effect van meer dan een miljard ton CO_2 per jaar. Ter vergelijking: de huidige jaarlijkse menselijke uitstoot bedraagt 26 miljard ton CO_2 per jaar. Dus nu al vormt de ontdooiende toendra een aanzienlijke bijdrage (4 procent) aan de broeikasgassen. Maar er is meer. In totaal zit er zo'n 450 miljard ton koolstof in de bodem. Als dat in de vorm van CO_2 vrijkomt is dat equivalent aan 17 jaar lang stoken van fossiele brandstoffen in het huidige tempo. Zonder die bijdrage wordt de temperatuurstijging in de komende eeuw door het Internationale Panel voor Klimaatverandering (IPCC) op één tot zes graden geschat ten opzichte van het jaar 2000. Men gaat er van uitgaat dat een stijging van meer dan twee graden het klimaat onomkeerbaar uit z'n evenwicht kan brengen.[1] Met CO_2 uit de toendra erbij komen we al snel in de gevarenzone. De Engelse krant *The Guardian* beschreef over Siberië als het kantelpunt (*tipping point*) van de klimaatsverandering.

Maar het kan nog erger. Wat de gevolgen zijn van de smeltende toendra, hangt voornamelijk af van de snelheid van de uitstoot. Wanneer alle koolstof in enkele jaren als methaan vrij zou komen, betekent dat een desastreuze temperatuurverhoging van enkele tientallen graden. Dat wordt niet erg waarschijnlijk geacht. Als het methaan langzamer vrijkomt, wordt het methaan in de loop van de tijd (20 jaar) in de atmosfeer omgezet in het minder schadelijke CO_2. Maar ook in dat optimistischere scenario gaat de ontdooiende toendra een flinke bijdrage leveren aan het broeikaseffect in de eenentwintigste eeuw.

Aan het einde van de zomer was Pearce overtuigd van de ernst van de zaak. Op 11 augustus 2005 publiceerde hij zijn artikel *Climate warning as Siberia melts*. Het nieuws werd opgepikt door ondermeer *Daily Telegraph, UPI, The Guardian, The Register* en *Moscow News*. In Nederland werd er, ondanks de komkommertijd, nauwelijks aandacht aan geschonken. We verkeerden in een nationale euforie over de wereldtitel polsstokhoogspringen van Rens Blom in Helsinki.

Verslaafd aan energie

U, ik, onze samenleving, de westerse wereld in zijn geheel is verslaafd aan energie. Onze maatschappij kan eenvoudigweg niet meer zonder en vertoont de klassieke kenmerken van een junkie. In eerste instantie de ontkenning, maar daarna volgt al snel de behoefte aan steeds meer. En bij onthouding is totale ontregeling het resultaat: rijen voor de pomp, hamsteren, plundering en desnoods oorlogsvoering.

Op individueel niveau heeft energieverslaving veel weg van luiheid en gemakzucht. Er mag dagelijks in Nederland meer dan tweehonderd kilometer file staan in ochtend- en avondspits, toch zet dat weinig mensen ertoe aan om op de fiets te stappen naar het dichtstbijzijnde station. Onderweg naar Hilversum ontmoette ik laatst iemand die dat wel gedaan had. Een vijftiger met gemillimeterd grijs haar (Wim de Bie-kapsel), stalen brilletje en fietstenue op een stevige hybride fiets. Achttien jaar lang had hij met de auto geforenst in de Randstad. Nu was hij in Amersfoort gaan wonen en fietste hij dagelijks op-en-neer naar Hilversum. Twintig kilometer in een krap uurtje fietsen, zomer of winter, weer of geen weer. Hij was ontspannen, gezond en straalde tevredenheid uit. 'Ik had dat veel eerder moeten doen,' vond hij. Het mooiste moment vond hij als hij Hilversum binnenfietste en dan op het fietspad langs die lange, lange rij wachtende auto's reed. Of op het fietspad onder de snelweg door waar bovenop het viaduct het verkeer vaststaat.

Rationeel gezien is ons verkeerssysteem met rijen stilstaande auto's allang niet meer adequaat, maar de autorijder weet zich veilig en comfortabel in zijn stalen cocon. Koffie, krantje, radio. Wie doet je wat. De fietsende vijftiger – ik kom hem zo nu en dan tegen en dan zetten we even flink de pas erin. 'Ik heb genoten!,' roept hij dan, doet denken aan een roker die gestopt is. Hetzelfde gevoel van opluchting, het zo-kan-het-ook-gevoel, een bevrijdend besef van iets verlost te zijn wat je al die tijd in zijn greep had, maar waaraan je je ontworsteld hebt: de energieverslaving.

Op het niveau van een land of de samenleving ligt de verslaving een stuk complexer. De manier waarop onze maatschappij is ingericht, is

gebouwd op goedkope energie. Hier is geen sprake van luiheid, maar van intensieve verstrengeling van energie met vervoer, stedenbouw, landbouw, bevolkingsdichtheid en industrie. Trek de stekker eruit en de hele samenleving zoals we die kennen stort in elkaar. Politici zijn zich daarvan bewust en beschouwen energie daarom van vitaal belang voor de samenleving. Een belang waarvoor oorlogen gevoerd worden, als het nodig is.

Een aardige maat voor de verslaving is de moeite die het kost om het Kyoto-protocol na te leven. Het protocol is een zelfopgelegde verplichting van 55 landen om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Het meest bekende broeikasgas CO_2 is een directe maat voor het verbruik van (fossiele) energie en daarmee een indicator voor de energieverslaving. Het Kyoto-protocol uit 1997 legde Nederland een CO_2-reductie op van zes procent ten opzichte van 1990. Even wat cijfers: in 1990 was de Nederlandse uitstoot 165 miljoen ton CO_2 per jaar, in 2004 was dat 183 miljoen ton.[2] Dat is een stijging van 10%. En toch claimt Nederland aan de Kyoto-norm te voldoen. Rara, hoe kan dat?

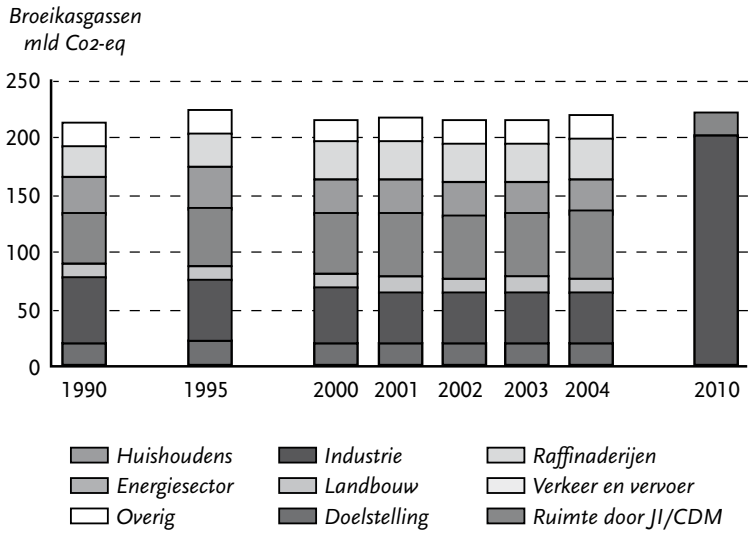

FIG.03 CO_2-uitstoot Nederland 1990–2010. – Bron: ECN

Dat Nederland toch een voldoende haalt voor Kyoto, is voornamelijk te danken aan een boekhoudkundige truc. Er is namelijk een soort mest-

boekhouding opgesteld voor broeikasgas, die landen in staat stelt om de CO_2-uitstoot in een ander land te beperken en de besparing op de eigen emissie in mindering te brengen. Mooie termen als *Clean Development Mechanism* en *Joint Implementation* moeten pijnlijke feiten verhullen, want de vreselijke waarheid is:
het lukt ons niet om de CO_2-uitstoot te verminderen. Niet in Nederland en niet in de wereld.

Dat laatste wordt duidelijk uit de meetreeks van Charles David Keeling op Hawaii. Hij mat er vanaf 1958 het CO_2-gehalte en zag in de loop der tijd de waarde met 17% toenemen (waarvan 4% sinds 1990). De zogenaamde Keeling-curve toont een gestaag stijgende CO_2-concentratie in de atmosfeer en het is daarmee een tamelijk ontnuchterend en verontrustend plaatje.

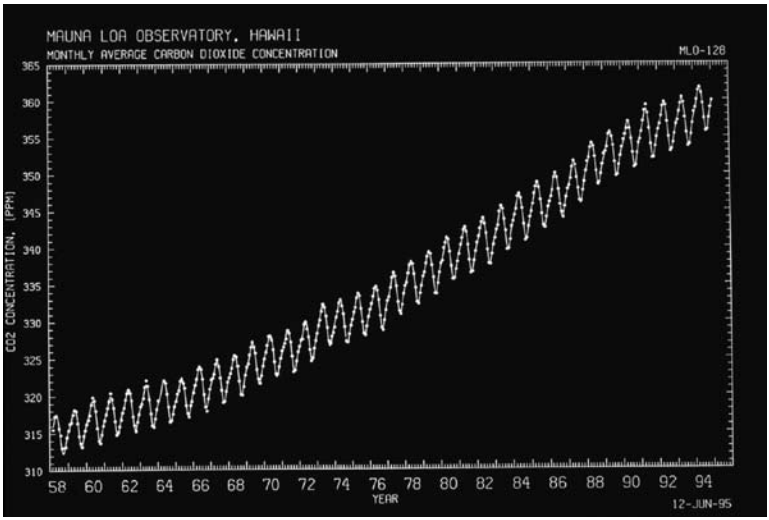

FIG.04 Keelingcurve. – Bron: Scripps Oceanography

Als het over klimaat gaat, staan verwachting en doelstelling haaks op elkaar. Eerst maar de doelstelling. Volgens aardwetenschapper Pier Vellinga (Vrije Universiteit) is 30 procent minder CO_2-uitstoot per jaar het absolute minimum dat behaald moet worden. Hij staat daarin niet alleen. De meeste wetenschappers raden dat aan, omdat het op termijn (tot 2030) de temperatuurstijging tot twee graden zou beperken. Twee graden temperatuurstijging wordt gezien als de grens. Daarboven zijn

de klimatologische rampen niet uit te sluiten. Vellinga noemt de mogelijkheid dat de Golfstroom zou kunnen stoppen, of dat methaan zou kunnen vrijkomen uit de zeebodem. Het broeikasgas methaan zou de temperatuur nog verder verhogen. De op hol geslagen temperatuur zal het landijs op Groenland doen wegsmelten, wat een zeespiegelstijging van vijf tot zeven meter betekent. En dan hebben we het nog niet eens over Antarctica. Daar ligt genoeg ijs om de zeespiegel 60 meter te laten stijgen. Dertig procent minder CO_2-uitstoot in 2030 is dus van groot belang om rampen te voorkomen.

Maar wat is de verwachting? De Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling OESO verwacht dat de wereld voorlopig nog sterk afhankelijk blijft van fossiele brandstof. Momenteel is 80 procent van alle energie afkomstig uit fossiele bron en de OESO verwacht daarin nog een lichte stijging. Daarenboven verwacht het Internationaal Energie Agentschap IEA dat het totale energieverbruik tot 2030 met 52 procent zal groeien.[3] Bij elkaar genomen betekent dat een verwachte toename van de CO_2-uitstoot met ruim 55 procent.

Dat is ons probleem met de energieverslaving: een 30-procentdaling is nodig, maar de verwachting is juist een stijging met 55 procent. Klimatologisch en economisch zitten we op ramkoers, maar we kunnen niet anders. We zijn verslaafd aan energie. Er is maar één ontsnapping mogelijk: met alle mogelijke middelen CO_2-vrije of duurzame energiebronnen ontwikkelen en opschalen en tegelijk de uitstoot van CO_2 drastisch verminderen door de inzet van efficiëntere technologie en wellicht ook door CO_2-opslag.

Energie

Energie betekent in het Grieks (energeia) letterlijk zoiets als 'in werk'. In de spraak kreeg het de betekenis van 'goddelijke actie' of 'toverkracht'. Van Dale schrijft: 1. Kracht waarmee men iets doet, naar iets streeft; 2. Eigenschap van een systeem om arbeid te kunnen leveren. We concentreren ons hier op de tweede betekenis.

De Duitser arts en natuurkundige Julius Robert von Mayer doet in 1842 een bijzondere ontdekking. Hij staat bij een papierfabriek wat te kijken naar een vat waarin papierpulp wordt gekneed. Een paard sjokt rond het

vat en drijft de kneedmolen aan. Het is een dagelijks tafereel in die tijd. Maar bijzonder is dat Von Mayer merkt dat de pulp in het vat warmer wordt door het kneden. Nog ongewoner is zijn inzicht dat de beweging van de pulp wordt omgezet in warmte. Von Mayer legt zo een verbinding tussen twee heel verschillende soorten van energie: warmte en beweging. De bewegingsenergie verdwijnt niet, begrijpt Von Mayer, maar wordt warmte. De hoeveelheid energie blijft daarbij altijd gelijk.

Dit principe, de wet van behoud van energie, staat bekend als de eerste hoofdwet van de thermodynamica, die losjes geformuleerd wordt als 'energie kan niet ontstaan of verloren gaan.'

Op dat moment zijn bewegingsleer (mechanica) en warmteleer (thermodynamica) gescheiden werelden, wat tot op de huidige dag te zien is aan de verschillende eenheden van energie. In de mechanica spreekt men van Newtonmeter (1 Nm is de arbeid verricht door een kracht van 1 Newton over een afstand van 1 meter). In de warmteleer neemt men de calorie als energie-eenheid (1 calorie maakt 1 gram water 1 graad warmer). De Britse brouwerszoon en onderzoeker James Prescott Joule (1818 – 1889) brengt die twee eenheden samen onder een nieuwe eenheid van energie: de Joule. (1 Nm = 1 Joule, 1 calorie = 4,2 Joule).

Een kopje hete thee op tafel heeft een dubbele energie-inhoud: het bevat warmte (heter dan de omgeving) en het kan arbeid verrichten (als het van de tafel valt). Kortom: energie is warmte plus arbeid, of $E = Q + W$.
Energie, hoewel onzichtbaar, kent vele verschijningsvormen: zwaarte-energie (lawine), bewegingsenergie (trein ramt perron), elektrische energie (bliksem treft boom), chemische energie (uitslaande brand), stralingsenergie (voorjaarszonnetje) en kernenergie. Om maar een aantal te noemen. Energie kan van de ene vorm in een andere worden omgezet, maar dat gaat meestal met verlies gepaard. Het gedeelte dat in de gewenste energievorm vrijkomt heet rendement, en heeft een waarde tussen 0 (geen omzetting) en 100 procent (volledige omzetting). Een gloeilamp bijvoorbeeld heeft een rendement van 5 procent, omdat 95 procent van de elektrische energie in warmte wordt omgezet en maar 5 procent in licht. Een gloeilamp is dus een kachel die licht geeft.

Bij verschillende omzettingen achter elkaar moet je de rendementen met elkaar vermenigvuldigen. Een mooi voorbeeld is een kar met schijnwerpers die wegwerkers 's nachts gebruiken. Een motor zet chemische energie om in beweging (40%), een generator maakt van beweging elek-

triciteit (80%) en een lamp zet elektriciteit om in licht (5%). Totaal rendement: 1,6 procent. De rest verdwijnt altijd als warmte.

Ons 'gebruik' van energie betekent altijd een omzetting van de ene vorm (chemische energie in gas bijvoorbeeld) in een andere (elektriciteit) om er iets nuttigs mee te doen (een pot thee zetten).

De verslaving aan fossiele energie begon in de loop van de zeventiende eeuw, gedreven door kolen. Kool was ook in de middeleeuwen al wel bekend, maar men gaf de voorkeur aan hout als brandstof. Steenkool werd beschouwd als brandstof voor de armen en de zwavelige vette rook maakte het een verre van aantrekkelijk alternatief.

Maar buitenshuis bleek steenkool ook voordelen te bieden. We hebben het dan over het begin van de zeventiende eeuw. Men wist toen dat je met kolen veel heter kunt stoken dan met hout. Steenkool werd daardoor een gewaardeerde brandstof in de beginnende ijzerindustrie. In de zeventiende eeuw legde steenkool de basis voor de industriële revolutie in Engeland. Behalve voor huishouden en metaalindustrie, was het toen al onmisbaar voor de fabrikage van glas, bakstenen, tegels, zout (door verdamping), bier brouwen en brood bakken.

Het karretje op rails in de kolenmijnen vormde de inspiratiebron voor de spoorwegen die aan begin van de negentiende eeuw verschijnen.[4] Mobiele stoommachines deden hun intrede vanaf het begin van de negentiende eeuw dankzij de inspanningen van James Watt. Vijftig jaar later begonnen zeilschepen het af te leggen tegen stoomboten. Honderd jaar later, rond 1900, liep zowat de hele samenleving op kolen. Het wereldwijde verbruik aan kolen was in één eeuw met meer dan 4000 procent toegenomen: van jaarlijks 15 miljoen ton in 1800 tot 700 miljoen ton per jaar in 1900.[5]

Stoommachines zorgden voor aandrijving van industrie, schepen en spoorwegen. Gaslampen (op kolengas: CO en H_2) verlichtten de straten in de stad. Fabrieken draaiden op volle toeren en bedreven voor het eerst massa-productie. De toegenomen welvaart en de beschikbaarheid van energie brachten ook een ongekende bevolkingsgroei teweeg. Tussen 1500 en 1900 verdrievoudigde de wereldbevolking van 500 miljoen naar 1,6 miljard. In de eeuw daarna verviervoudigde de wereldbevolking tot 6,5 miljard in 2006. Maar die groeispurt komt voornamelijk op het conto van de olie.

De eeuw van de olie

Olie was in de tweede helft van de negentiende eeuw nog vooral in trek als smeermiddel voor de bewegende machinerie: stoommachines, locomotieven en overbrengingen. De olie had toen een biologische oorsprong, was afkomstig van planten en dieren, met name van walvissen, die in een tempo van 15 duizend per jaar gevangen werden. Maar tegen het einde van de negentiende eeuw kreeg de commerciële walvisvaart het steeds moeilijker, omdat ze de populatie in haar ijver bijna had uitgeroeid. De walvisolie, die vanwege de schone verbranding zeer geliefd was voor olielampen, steeg daardoor enorm in prijs. Bovendien stelden de steeds grotere machines ook hogere eisen aan de smeerolie.

Toen in 1859 Edwin L. Drake in Pennsylvania de eerste oliebron aanboorde, betekende dat een welkome bron voor goedkope smeermiddelen en –na raffinage – lampolie. De druk op de walvissen nam daardoor af (aardolie heeft de potvis waarschijnlijk voor uitsterven behoed) en de vraag naar fossiele smeermiddelen en lampolie bleef stijgen. Binnen enkele decennia verschenen er wereldwijd een aantal grote spelers op het toneel, wier namen nu nog steeds bekend zijn. In Amerika John D. Rockefeller (Standard Oil), in Baku (1870) Ludwig Nobel (de broer van Alfred), later in samenwerking met de Franse Rothschild-familie, en in Indonesië (rond 1890) Shell. De 'productie'[6] van olie steeg wereldwijd gestaag, alleen dreigde de vraag naar lampolie in te storten na de uitvinding van het elektrisch licht door Thomas Edison. Maar een andere toepassing voor de olie was al snel gevonden: als stookolie. Er verschenen fornuizen op olie en heetwaterboilers, zowel aan de wal als aan boord van treinen en schepen. Een promotiecampagne van Standard Oil bracht de nieuwe producten onder de aandacht. Een nieuwe industrie bloeide op, maar wachtte nog op haar ware bestemming: de auto.

Toen de Duitse ingenieur Nikolaus Otto omstreeks 1870 zijn interne verbrandingsmotor ontwikkelde, was dat oorspronkelijk als stationaire gasmotor bedoeld. Het moest een compacter alternatief worden voor de stoommachine, waar de verbranding buiten de cilinder plaatsvond:

onder de stoomketel. Als het zou lukken de verbranding in de cilinder plaats te laten vinden, zou dat een veel kleinere en eenvoudigere machine opleveren dan een stoommachine met een vergelijkbaar vermogen. Met olie had het allemaal nog weinig te maken, en al helemaal niet met vervoermiddelen. Samen met Gottlieb Daimler en Wilhelm Maybach ontwikkelde Nikolaus Otto de viertakt motor, die – natuurlijk met de nodige moderniseringen – tot op de dag van vandaag in gebruik is. De oorspronkelijke 'Gasmotorenfabrik' bestaat ook nog onder de naam Deutz AG.

Opvallend is dat Otto zijn motor alleen voor stationaire toepassingen verkocht. Het was Karl Benz die de verbrandingsmotor op een driewielig frame zette en op 28 februari 1886 het patent kreeg op de automobiel. Daimler en Maybach volgden zijn voorbeeld en plaatsten datzelfde jaar als experiment een stationaire gasmotor in een koets. Drie jaar later bouwden ze hun eerste auto en weer drie jaar later, in 1892, verkochten ze hun eerste automobiel aan een klant. Pas in 1926 fuseerden de voormalige concurrenten tot de firma Daimler-Benz.

Ook de andere verbrandingsmotor, de dieselmotor, werd aan het eind van de negentiende eeuw ontwikkeld, maar eveneens nog niet met het oog op (fossiele) olie. De Duitse uitvinder Rudolf Diesel (1858–1913) demonstreerde zijn motor op de wereldtentoonstelling in 1900 op pindaolie.[7] De dieselmotor heeft geen bougies nodig voor de ontbranding van het gasmengsel. De druk in de cilinder loopt zo hoog op, en daarmee de temperatuur, dat het mengsel zonder ontsteking tot ontbranding overgaat.

Toen Rudolf Diesel dat in 1893 voor het eerst probeerde, kostte hem dat bijna zijn leven. Hij had een drie meter hoge machine gebouwd waarin kolengas en lucht samengeperst werden tot een druk van 80 atmosfeer. Toen het mengsel ontbrandde, gaf dat zo'n explosie dat het Diesel bijna noodlottig werd. Zeven maanden later, op 17 februari 1894, lukte het hem om een eencilinder dieselmotor een minuut lang te laten draaien. Zes jaar later stond hij op de wereldtentoonstelling.

Benzine (Engels: *gasoline*) was vóór de uitvinding van de verbrandingsmotoren voornamelijk bekend als bestrijdingsmiddel tegen luizen en als oplosmiddel (wasbenzine). Maar het was ook berucht omdat het, vluchtig als het was, makkelijk tot explosies leidde. Afkomstig uit de destillatie van aardolie, werd het als afvalproduct verkocht voor een cent per liter.

De gasmotor van Nikolaus Otto en het vluchtige afvalproduct van de raffinage vormden de gouden combinatie die de wereld binnen een eeuw totaal zou veranderen. De negentiende eeuw was de eeuw van de kolen geweest. De winning, de raffinage en de distributie van olie was aan het eind van de negentiende eeuw een grote en groeiende industrie geworden, maar het zou tot na 1900 duren voordat olie de rol van kolen zou overnemen en overtreffen. De twintigste eeuw is op alle fronten de eeuw van de olie geworden.

Globalisering

De auto was oorspronkelijk vooral een speeltje voor de rijken. De slechte wegen stonden een doorbraak in de weg. In Amerika slaagden in het begin van de twintigste eeuw autobezitters en fabrikanten erin, samen met lobbyisten van de banden- en olie-industrie, de overheid ertoe over te halen betere wegen aan te leggen. Ze zouden zo de wegbereiders worden van een nieuwe stralende toekomst. Aardige bijkomstigheid was dat onbruikbare zware oliefracties zoals bitumen opeens van pas bleken te komen bij de aanleg van wegen. De standaard wegen bestaan uit asfalt, een mengsel van steen, zand, lucht en vulstof dat door het teerachtige bitumen bijeen wordt gehouden.

Natuurlijk waren er nog andere obstakels, zoals de prijs van een auto. Henri Ford stelde zich tot doel de auto zo goedkoop te maken dat iedereen er een zou kunnen kopen. Hij deed dat door het productieproces tot het uiterste te mechaniseren en te standaardiseren. Nog steeds geldt de Ford-fabriek als het icoon van het lopendebandwerk.

Niettemin bleven auto's duurder dan een gemiddeld gezinnetje omstreeks 1920 kon sparen. Ook dat obstakel werd voortvarend aangepakt, door de inzet van reclamecampagnes en kredietmogelijkheden. Autofabrikanten verviervoudigden in tien jaar hun reclame-uitgaven en ze begaven zich ook in de kredietverlening. Het resultaat was dat in 1927 één op de vijf Amerikanen een auto bezat en dat driekwart daarvan op afbetaling was gekocht. De auto-industrie was niet meer te stoppen en bleef produceren, ook al zaten de afnemers tot over hun nek in de schulden. De economische depressie die in 1930 inzette, had veel te maken met de schuldenlasten en met de overproductie. Banken gingen onderuit, bedrijven gingen failliet en mensen raakten massaal werkloos.

Toch had de autoindustrie inmiddels zo'n centrale rol ingenomen dat die ook na de depressie de toon bleef zetten in Amerika. Olie-, staal-, rubber-, glas- en kunstofindustrie zetten allemaal in op het zelfde doel: de auto. In het klein verschenen overal tankstations, garages, onderdelenwinkels, wegrestaurants etcetera. De auto begon de manier van leven en de inrichting van het land te veranderen.

FIG.05 Pompstation in Texas omstreeks 1937. – Image copyright by the Sloane Collection

In Amerika begonnen steden zich in alle richtingen uit te breiden met tamelijk amorfe 'suburbs'. De auto maakte het mogelijk om het werk in de stad te combineren met het wonen in een vrijstaand huis met rondom een gemaaid gazon. Het klinkt als het Amerikaanse jarenvijftigideaal, maar een halve eeuw later is de nieuwbouw in Nederland niet veel anders georganiseerd. De buitenwijken tellen hier ook één en liefst twee auto's per huishouden. Meer dan de helft van de werkenden gaat in Nederland met de auto naar het werk. Gemiddeld telt Nederland één auto per drie personen (zo'n 5,7 miljoen auto's) en elk jaar wordt er een half miljoen nieuwe geïmporteerd.

Het Ruimtelijk Planbureau RPB verwacht daar overigens wel problemen mee. In het rapport *Behalve de dagelijkse files* voorspellen de auteurs bij ongewijzigd beleid een heus verkeersinfarct: 'In 2020 zijn de daluren net zo druk als de avondspits nu. De verwachting is dan ook dat het personenvervoer met twintig procent en het vrachtvervoer zelfs met veertig tot tachtig procent toeneemt.'[8] Volgens verkeerskundige Maaike Snelders van de TU-Delft zijn er drastische maatregelen nodig: vierdui-

zend kilometer extra asfalt, rekening rijden in de Randstad of de aanleg van bufferzones waar auto's moeten wachten totdat de file weer is opgelost.[9]

Wereldwijd wegen auto's vier keer meer dan de totale mensheid. En ze gebruiken ook vier keer meer energie. Publicist Richard Heinberg merkt op dat iemand van Mars de indruk zou krijgen dat niet de mens, maar de auto de dominante levensvorm op aarde is.[10]

Ene David Armstrong grapte in een wedstrijd van *New Scientist* dat een buitenaards wezen dit telegram naar huis zou sturen: 'Dominante soort: auto. Kleurrijk exoskelet en bizarre voortplanting via tweevoetige slaafse subsoort. Agressief, maar voorspelbaar. Intelligentie onzeker.'

Net als de auto, begon ook het vliegtuig als een onbetrouwbaar speeltje, gedreven door de oeroude droom van de mens zich vrij als een vogel door de lucht te kunnen bewegen, niet gehinderd door bergketens, oceanen of afstand. Op 17 december 1903 realiseerden de gebroeders Wilbur en Orville Wright de eerste gemotoriseerde vlucht. De eerste lijndiensten deden vanaf 1920 hun intrede. De post was een van de eerste diensten die er gebruik van maakte.

De passagiers bleven in die tijd beperkt tot de rijken en de avonturiers. Voor de anderen werd vliegen pas bereikbaar vanaf de jaren vijftig. Eerst mondjesmaat, maar naarmate de tickets goedkoper werden, werd het vliegtuig voor meer mensen bereikbaar. In de jaren zeventig was het vliegtuig het standaardvervoermiddel voor de lange afstand. Dat bracht een enorme groei van het toerisme teweeg. Vlogen er in 1950 25 miljoen vakantiegangers de wereld over, in 2000 waren het er 500 miljoen. Hotels, reisbureaus, restaurants en autoverhuurbedrijven schoten overal ter wereld als paddestoelen uit de grond.

Luchttransport is ook de slagader van de globalisering. Groeide het aantal passagiersvluchten sinds 1960 jaarlijks met 9 procent, de vrachtvluchten namen ieder jaar met 11 procent toe. Het economisch belang van goedkoop wereldwijd transport is zo groot dat de vliegtuigbrandstof kerosine nog steeds belastingvrij is (bij benzine bestaat tweederde van de prijs aan de pomp uit belastingen en accijns). Naast het luchttransport is het containervervoer per schip, met goede aansluiting op spoorwegen of het wegennetwerk, een essentiële schakel in de wereldwijde economie. Wat alle vervoersvormen gemeenschappelijk hebben, is hun afhankelijkheid van olie als grondstof. Zonder olie geen globalisering.

Kunstmest

Zonder olie en gas ook geen kunstmest. Bemesting was altijd een van de grootste zorgen voor de boer. Na een aantal jaren van intensieve teelt, daalt het stikstofgehalte van de grond en groeien gewassen er slecht op. Traditioneel loste men dat op door de akker een periode braak te laten liggen of door bemesting met dierlijke mest. Maar toen in de achttiende eeuw de bevolking in Europa begon te groeien, leverde natuurlijke bemesting onvoldoende op. Gelukkig troffen ontdekkingsreizigers in 1850 voor de kust van Chili en Peru vogeleilanden aan die met dikke lagen vogelpoep – guano – bedekt waren, een rijke bron aan stikstof. Twintig jaar lang voeren de zogenaamde salpeterschepen tussen Zuid-Amerika en Europa (Duitsland) heen en weer voor het guanotransport. Toen was het op en moest men uitzien naar andere bronnen van stikstof.

De doorbraak kwam van de Duitse chemicus Fritz Haber (1908) die een proces ontwikkelde om stikstof (N_2) uit de lucht (die voor 80 procent uit stikstof bestaat) te binden aan waterstof in de vorm van ammoniak (NH_3).[11] Haber kreeg er in 1918 de Nobelprijs voor chemie voor. Carl Bosch, die bij het chemiebedrijf BASF werkte, perfectioneerde samen met Haber het proces voor grootschalige toepassing. Oorspronkelijk gingen ze daarbij uit van waterstof uit kolengas (CO en H_2), later gebruikten ze aardgas als uitgangsmateriaal.[12] Aardgas (CH_4) was in de negentiende eeuw vooral populair als brandstof voor gaslampen. Toen de elektriciteit zijn intree deed, moest de gasindustrie omzien naar een andere markt. Het gebruik als grondstof voor kunstmest moet hen verrast hebben.

Volgens de geograaf Vaclav Smil hebben Haber en Bosch de belangrijkste uitvinding van de twintigste eeuw gedaan,[13] want het Haber-Bosch proces is verantwoordelijk voor vrijwel alle kunstmest die op boerderijen gebruikt wordt. Een hoeveelheid die wereldwijd vrijwel gelijk is aan de natuurlijke bemesting. Jaarlijks wordt er 500 miljoen ton kunstmest geproduceerd voor de bemesting van bijna de helft van de voedselgewassen.[14] Je kunt stellen dat niemand meer heeft bijgedragen aan de voedselvoorziening en aan de twintigste-eeuwse bevolkingsexplosie (in 100 jaar van 1,6 naar 6,5 miljard) dan Haber en Bosch.

Toch komen ze niet in aanmerking voor een heiligenstatus. Hun vinding heeft namelijk ook een grote rol gespeeld in de Duitse oorlogsindustrie. Ammonia werd geoxideerd tot salpeterzuur, wat op zijn beurt weer onmisbaar was bij de productie van verschillende explosieven en

munitie. Haber heeft zelfs de twijfelachtige bijnaam 'vader van de chemische oorlogsvoering' gekregen voor zijn leidende rol in de productie van gifgassen (waaronder chloorgas) tijdens de eerste wereldoorlog. Ook aan de ontwikkeling van het vernietigingsgas Zyklon-B dat tijdens de Tweede Wereldoorlog in concentratiekampen werd ingezet, heeft Fritz Haber meegewerkt. Die chemische ijver mocht overigens niet verhinderen dat hij in 1933 het land uit moest vanwege zijn joodse achtergrond. Hij overleed kort daarna. Door een bizarre speling van het lot is zijn werk verbonden aan het leven van miljarden en de dood van miljoenen mensen.

De verbinding tussen fossiele brandstof en voedselproductie gaat verder dan het aardgas dat als grondstof voor de kunstmest wordt gebruikt. Tractoren en andere landbouwvoertuigen hebben de werkpaarden en de ossenploeg vervangen. Daardoor kwam er meer land vrij voor voedselgewassen. Bovendien werd de landbouw minder arbeidsintensief waardoor minder boeren het werk konden doen. Grotere boerderijen werden niet alleen mogelijk, maar ook economisch noodzakelijk.

Daarnaast deden vanaf de jaren vijftig onkruidverdelgers en insecticiden hun intrede, eveneens gevoed door de petrochemische industrie, waardoor grote monoculturen niet alleen mogelijk, maar ook de norm werden. In de jaren zestig en zeventig werden de verworvenheden van de moderne landbouw (mechanisatie, kunstmest en bestrijdingsmiddelen) op initiatief van ontwikkelingsorganisaties ook in ontwikkelingslanden geïntroduceerd. De zogenaamde Groene Revolutie resulteerde in betere oogsten, maar tegen aanzienlijke ecologische en sociale kosten.

De enorme stijging in de voedselproductie in de afgelopen eeuw is dus voor een groot deel terug te voeren op de beschikbaarheid van olie. De keerzijde van het succesverhaal is dat een stijging van de olieprijs of een verminderde aanvoer van olie negatieve consequenties zal hebben voor de wereldvoedselvoorziening. Zonder olie minder voedsel. Waarschijnlijk de helft minder.

In de afgelopen eeuw is de wereldbevolking verviervoudigd. Binnen een eeuw pompen we naar verwachting de laatste vaten olie op. Daarmee valt een pijler weg onder de wereldvoedselvoorziening. De bevolkingspolitiek in de wereld zou dus in moeten zetten op een bevolkingsdaling om hongersnoden en daarmee samenhangend geweld te voorkomen.

Politiek

Olie en gas zijn wereldwijd zo belangrijk geworden, dat ze nu een belangrijke geopolitieke machtsfactor zijn. Wat dat betekent, merkten we voor het eerst toen in 1973 een aantal Arabische landen een olieboycot instelden tegen landen die in de Jom Kippoer-oorlog Israël hadden gesteund. De Arabieren verhoogden de olieprijs met 70 procent en verminderden de olieproductie maandelijks met 5 procent, zodat de olieprijs binnen korte tijd verviervoudigde (van 3 naar 12 dollar per vat). Nederland en Amerika werden vanwege hun steun aan Israël volledig geboycot, waardoor er lange rijen voor de pomp ontstonden en in Nederland de autovrije zondag werd ingevoerd. Doordat veel economische sectoren van de olie afhankelijk zijn (landbouw, industrie en vervoer), stortte de olieboycot de gehele wereldeconomie in een dip, die tot tien jaar later nog voelbaar was.

Amerika kon tot 1960 in de eigen oliebehoefte voorzien, maar daarna werd olie-import vanuit het Midden-Oosten noodzakelijk. In 1970 was de piek in de Amerikaanse olieproductie bereikt en sindsdien is binnenlandse productie van de VS gestaag gedaald. Dat betekent dat Amerika steeds afhankelijker werd van olie-import en niet langer in staat was om de prijs van olie te bepalen. Die macht lag nu bij Saoedi-Arabië als grootste olie-exporteur en de belangrijkste stem binnen de OPEC ('Organisation of Petroleum Exporting Countries' met tien leden). De OPEC had het Westen op de knieën gedwongen, maar was natuurlijk ook afhankelijk van de inkomsten. Uiteindelijk werd de boycot begin 1974 opgeheven na onderhandelingen tijdens een conferentie in Washington. Niettemin bleef de olieprijs hoog en was men begonnen na te denken over energiebesparing, zuinigere auto's en de ontwikkeling van alternatieve energiebronnen.

Een volgende oliecrisis was in 1979. In Iran was de Sjah afgezet die in 1953 door de Amerikanen in het zadel was geholpen. Maar omdat de Sjah de oliehandel met Amerika en Engeland juist wilde herzien, kwam de revolutie de Amerikanen niet slecht uit. Althans, dat dacht men aanvankelijk. Maar in de Iraaks-Iraanse oorlog (1980–1988) steunde Amerika Irak om zijn belangen in de regio veilig te stellen. Irak moest als waakhond de oliebelangen tegen het oprukkend fundamentalisme verdedigen. Toch liep de productie terug en de tweede oliecrisis was het gevolg. De olieprijs verdubbelde tot 30 dollar per vat. Wereldwijd bracht dat prijsstijgingen teweeg en een flinke inflatie. In Amerika stegen de

prijzen in één jaar tijd met 10 procent. In Nederland kwam de verzorgingsstaat onder druk te staan, Nederland kon de voorzieningen niet meer opbrengen en het kabinet Lubbers zag zich genoodzaakt de uitkeringen en de lonen te verlagen. De stijgende werkloosheid probeerde men op initiatief van de vakbeweging een halt toe te roepen door de invoering van de arbeidstijdverkorting, een verworvenheid die tot op de huidige dag voortbestaat.

In 1982 daalde de olieprijs plotseling doordat er een olie-overschot was ontstaan. Dat was te danken aan grote opgebouwde reserves, aan besparingen en aan een stagnerende economie. De inflatie trok weg en de internationale economie veerde weer op. De OPEC-landen probeerden de olieprijs te sturen door de productie te variëren. Zo produceerde Saoedi-Arabië in 1985 maar de helft van het toegewezen quotum in de hoop daarmee de olieprijs kunstmatig hoog te houden. Maar een jaar later draaide de Saoediërs de kraan volledig open, waardoor de olieprijs van meer dan 30 dollar kelderde naar 10 dollar per vat. Het initiatief hiervoor kwam van de Britse premier Margaret Thatcher die de Noordzeeolie in de uitverkoop deed met de bedoeling de Russische olie-inkomsten af te knijpen om zo een strategisch voordeel te behalen in de Koude Oorlog. Een plan dat ze samen met Ronald Reagan had bedacht, en waar ze nu ook de Saoediërs achter kreeg.

De Sovjet-economie kreeg inderdaad een zware klap, maar dat gold ook voor de Amerikaanse olie-industrie. George Bush senior verdedigde de belangen van de oliebaronnen en riep de Amerikaanse overheid op om maatregelen te nemen. Het vrijemarktdenken heeft zo zijn grenzen. Uiteindelijk kwamen OPEC- en niet-OPEC-olieproducenten overeen om gezamelijk de olieprijs te bepalen, hoewel dat nooit echt gewerkt heeft. Maar toen aan het prijsduiken een einde was gekomen, was Amerika er meer dan ooit van overtuigd geraakt dat een sterke aanwezigheid in het Midden-Oosten essentieel was om de vitale toegang tot olie veilig te stellen.

Die Amerikaanse aanwezigheid werd tijdens de Golfoorlog in 1990 opeens heel reëel. De Iraakse president Saddam Hussein was Koeweit binnengevallen na een conflict over het al-Rumeilah-olieveld.

Koeweit zou het olieveld onder de grens door hebben aangeboord, waarna Saddam zijn troepen naar de grens met Koeweit stuurde. In die periode van toenemende dreiging had er op 25 juli 1990 in het Presidentiëel Paleis in Bagdad een merkwaardig gesprek plaats tussen Saddam Hussein en de Amerikaanse ambassadrice April Glaspie. Saddam

vertelde dat hij overwoog de ruzie met Iran over de grensrivier Shatt-al-Arab te laten rusten om in plaats daarvan Koeweit in te lijven. Koeweit was historisch gezien een provincie van Irak die zich in 1961 onafhankelijk verklaarde, tot het ongenoegen van Irak. Saddam vond het tijd voor een hereniging en vroeg de ambassadrice wat de Verenigde Staten daarvan zouden vinden.

'Wij hebben geen mening over uw inter-Arabische conflicten, zoals uw onenigheid met Koeweit,' antwoordde mevrouw Glaspie.[15] 'Minister Baker heeft me verteld uw te verzekeren, zoals eerder in 1960 al gebeurd is, dat de kwestie Koeweit geen zaak is voor de Amerikanen.' Saddam glimlachte.

Acht dagen later, op 2 augustus 1990, vielen Iraakse troepen Koeweit binnen. In Amerika was men verrast door de invasie. In allerijl zijn toen troepen naar de Golf verscheept, waar men in Saoedi-Arabië bases inrichtte. Vanuit een positie als trouwe, zij het uiterst wrede, bondgenoot van de VS, was Saddam Hussein nu plotseling de vijand.

Volgens analist Stephen C. Pelletière was 'de Golfoorlog een krachtige expressie van Amerika's voornemen om zijn controle over het Midden-Oosten te vestigen'.[16] In de jaren daarna werd die controle gedemonstreerd. Het embargo tegen Irak, na Saoedi-Arabië het land met de grootste oliereserves, hield per dag twee tot drie miljoen vaten olie weg van de markt, waardoor de andere partijen hun quota konden verhogen. Toen de olieprijzen ongemakkelijk hoog werden, kreeg Saddam weer toestemming om olie te exporteren. Voor humanitaire doeleinden, het zogenaamde olie-voor-voedsel programma, waarvan de geëxporteerde olie voornamelijk in Amerika terechtkwam.

De tweede Golfoorlog brak uit op 20 maart 2003, nu onder leiding van president George Bush junior die de jacht opende op Saddam Hussein. Vader Bush had Saddam juist laten zitten, omdat hij liever met een verslagen Saddam van doen had dan met een mogelijke nieuwe ayatollah op de Iraakse olievoorraden.

Aanvankelijk gold de tweede Golfoorlog als de volgende stap in de oorlog tegen het internationale terrorisme, als reactie op de aanslag op 11 september 2001 op het World Trade Center in New York en het Pentagon in Washington. De terreurorganisatie Al-Kaida werd verantwoordelijk gehouden en de leider Osama bin Laden zou zich schuil houden in Afghanistan. Vandaar de invasie van dat land in oktober 2001. Maar een verband tussen Al-Kaida en Irak werd nooit aangetoond.

In de aanloop van de invasie lag de nadruk op massavernietigingswapens die Saddam Hussein in zijn arsenaal zou hebben. Die zouden volgens een presentatie van Minister van Buitenlandse Zaken Colin Powell op 5 februari 2003 bij de VN een bedreiging voor de wereldvrede vormen en daarom een aanval onvermijdelijk maken.[17] De massavernietigingswapens zijn echter nooit aangetroffen en Irak is vervallen tot een staat in burgeroorlog tussen de verschillende Islamitische groeperingen en de Koerden in de noorden. Er is nooit aangetoond dat de oliereserves een directe rol hebben gespeeld in de invasie. Aan de andere kant is wel duidelijk dat de Amerikaanse aanwezigheid in het Midden-Oosten, ter verdediging van de vitale belangen – lees: olie – een doorn in het oog is van Osama bin Laden. De aanslag van 11 september 2001 maakte in één keer duidelijk hoe gevaarlijk het is om te zeer afhankelijk te zijn van energie-import.

Olie is een belangrijke factor in het geopolitieke machtsspel en naarmate de beschikbaarheid minder wordt, zal er waarschijnlijk harder om gevochten worden. Daarom alleen al lijkt het verstandig om de afhankelijkheid ervan te verminderen en alternatieve bronnen te ontwikkelen. De Zweedse overheid heeft zich voorgenomen om in 2020 onafhankelijk te zijn van olie. Een voorbeeld dat navolging verdient.

Hubbert's peak

De olievoorraad is niet oneindig. Dat kan iedereen op zijn klompen aanvoelen maar dat is niet goed genoeg. De vraag is hoeveel olie er nog is en hoelang die meegaat.

Oliewinnig is langzaam opgekomen vanaf 1859 toen op 28 augustus Edwin Drake en zijn assistent voor het eerst een boorgat zagen opvullen met aardolie, dat van slechts 21 meter diepte omhoog kwam. Aanvankelijk was oliewinning nog kleinschalig, maar dat veranderde vanaf 1901 met de Spindletop-bron in Beaumont, Texas. Het was de eerste bron in het rijke gebied van de Golf van Mexico. Daarna is in de loop van de twintigste eeuw de olieproductie gestaag gestegen, eerst in de VS en daarna in andere gebieden van de wereld.

Maar op een gegeven moment bereikt de olieproductie een piek, waarna de terugval intreedt en de productie daalt. Eerst langzaam, daarna sneller. Voorbij de piek wordt het steeds moeilijker om uit een bron olie te winnen, als yoghurt uit een bijna leeg pak. Het gevolg is dat de prijs per gewonnen vat olie steeds verder omhoog schiet.

De olieproductie als functie van de tijd ziet eruit als de omtrek van een kerkklok: toenemende stijging, ronde top en afvlakkende daling. De vraag is wanneer de top van de kromme bereikt wordt. Volgens emiritus hoogleraar Kenneth Deffeyes van de Princeton Universiteit viel de piek op de avond van 24 november 2005, de avond van *Thanksgiving* in Amerika. Natuurlijk is het onzinnig om zoiets op een dag vast te stellen, het ging hem ook meer om de term van de feestdag: Laten we dankbaar zijn voor wat de olie ons geleverd heeft, maar we moeten wel reëel zijn. *The picknick is over.* Deffeyes illustreert zijn punt met de laatste productiecijfers. In 2003 was de olieproductie slechts 3 procent groter dan in 1998, dat wil zeggen een minimale groei van 0,6 procent per jaar. En dat heeft veel weg van de top van een curve.

Deffeyes baseert zijn uitspraak op de methode van de geoloog M. King Hubbert die in 1956 voorspelde dat de piek van de Amerikaanse olieproductie in 1970 zou zijn. Toen de binnenlandse productie inderdaad vanaf 1972 begon terug te lopen was *Hubbert's Peak* een begrip en

werd Hubbert zelf door milieumensen als held gezien. Hubbert heeft in 1969 dezelfde berekening op wereldschaal gedaan en berekende een mondiale productiepiek in 2000. Deffeyes komt nu met de nieuwste gegevens een paar jaar later uit: eind 2005.

Natuurlijk zijn Hubbert's berekeningen niet onomstreden, er zijn immers grote belangen mee gemoeid. Andere analisten komen op basis van de gegevens van de Amerikaanse geologische dienst[18] een stuk positiever uit en en voorzien pas een maximum voor 2036.[19]

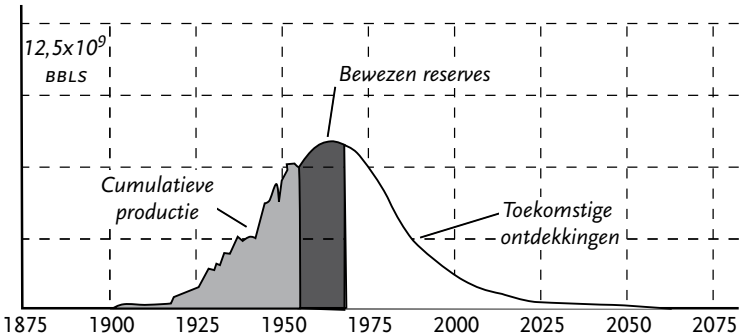

FIG.06 Voorspelling over de Texaanse olieproductie door M. King Hubbert in opdracht van Shell in 1956. Zijn voorspelling van een dalende Amerikaanse olieproductie in 1972 werd door de praktijk bevestigd.

M. King Hubbert ging strikt mathematisch te werk. Zijn stuk uit 1956 in opdracht van Shell ging dan ook velen boven de pet en zelfs een toegankelijker berekening uit 1982 bevatte nog 150 pagina's met veel formules. Deffeyes volgt in zijn boek *Beyond Oil* dezelfde logica, maar met een stuk minder wiskunde.

Hubbert gebruikte een methode die biologen gebruiken om de grootte van een populatie te bepalen en werkte die om voor de olieproductie. Hij paste die berekening toe op de Amerikaanse binnenlandse olieproductie. Voor ieder jaar zette hij de jaarproductie uit tegen de jaarproductie gedeeld door de totale productie tot dan toe. Ieder jaar leverde een punt op in de grafiek. Vanaf 1958 vormden de punten een een dalende rechte lijn, die de as sneed op 228 miljard vaten. Dat was dus de totale binnenlandse olievoorraad van de Verenigde Staten.

De geologische dienst USGS schatte die hoeveelheid op 362 miljard vaten schat, wat in de verste verte niet overeenkwam met Hubberts grafiek. Deffeyes schreef daarover nogal droogjes op dat de rechte lijn een

plotselinge knik moest vertonen of dat de geologische dienst erop gerekend had om Irak als 51-ste Amerikaanse staat in te lijven. Een logische verklaring voor de schatting van de dienst lijkt moeilijk te geven.

Het is natuurlijk aardig om een goede schatting van de totale hoeveelheid olie te hebben, maar in de praktijk is het belangrijker te weten wanneer er een piek in de olieproductie optreedt en wanneer we te maken krijgen met teruglopende olieleveranties. Dan wordt de vraag namelijk groter dan het aanbod, met stijgende olieprijzen als gevolg.

Voor de bepaling van de piek rekent Deffeyes, in navolging van Hubbert, de jaarproductie om als functie van de totale productie tot dan toe. Ieder jaar levert een punt op in de grafiek. De wiskundige functie die de punten het best benadert is een zogenaamde klokkromme.

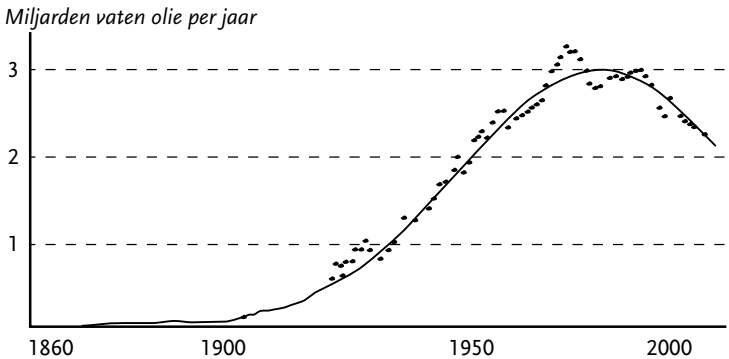

FIG.07 Opeenvolgende jaarproducties VS volgen keurige een klokvormige kromme.
- Bron: Kenneth Deffeyes, Beyond Oil

In de grafiek is te zien dat de Amerikaanse jaarproductie zijn maximum van 3,2 miljard vaten bereikte in 1972, toen de voorraad nog 100 miljard vaten bedroeg. Dat is de helft van de oorspronkelijke binnenlandse voorraad van 228 miljard vaten.

Dezelfde aanpak paste Deffeyes toe op de wereldolieproductie. Daar lag de jaarproductie vanaf 1983 tot 2003 op een rechte dalende lijn. Het snijpunt van die lijn met de horizontale as, de totale wereldolievoorraad, bedraagt ongeveer 2.000 miljard vaten. De immer optimistische Amerikaanse geologisch dienst houdt het om onnaspeurbare redenen op 3.012 miljard vaten. Omgezet levert dit een grafiek op die piekt in 2005

of in de eerste maanden van 2006. Daarbij tekende Deffeyes aan dat de wereldolieproductie sinds 1998 nauwelijks meer stijgt, ook een teken dat we aan de top zijn beland. En dat geen enkel land meer over ongebruikte productiefaciliteiten beschikt. Met andere woorden: we hebben de productiepiek al gehad.

Eerder was er al een piek in nieuwe bronnen (*'hits'*) en in ontdekkingen (*'discoveries'*). Het verschil is subtiel. Als nieuwe bronnen gelden de eerste bronnen die in een nieuw olieveld zijn aangebracht. Ontdekkingen zijn gedefinieerd als de som van alle ooit geproduceerde olie plus de bekende reserves in een bepaald jaar. Klinkt ingewikkeld, maar waar het op neerkomt is dat er eerst een piek is geweest omstreeks 1950 van nieuwe bronnen, gevolgd door een piek in ontdekkingen rond 1980. De productie loopt daar zo'n twintig jaar achteraan en is omstreeks 2006 gepiekt.

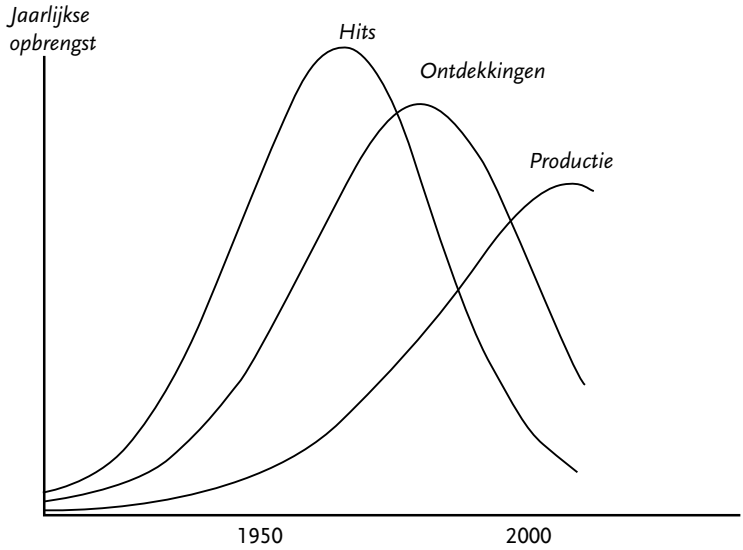

FIG.08 Nieuwe bronnen, ontdekkingen en productie als functie van de tijd. Vanaf 1950 neemt het aantal nieuwe velden af, vanaf 1975 de hoeveelheid geproduceerde olie plus de reserves en tenslotte vermindert ook de productie. Volgens Deffeyes was dat in december 2005. – Illustratie naar Beyond Oil, Kenneth Deffeyes.

Volgens *Hubbert's Peak* is de komende jaren een teruglopende olieproductie te verwachten. Aanvankelijk een beetje minder, maar na tien jaar al 10 procent minder dan nu. Na enkele decennia zal er fors minder

geproduceerd worden totdat aan het eind van de eenentwigste eeuw het olietijdperk zo goed als voorbij zal zijn.

Brandend ijs

Eind 2006 kwamen in Edinburgh honderd wetenschappers uit twintig landen bijeen om de mogelijkheden en de bedreigingen te bespreken van een recent ontdekte fossiele brandstof: in ijs opgeslagen methaan, dat zich vlak onder de zeebodem bevindt.

Gashydraten zijn ondoorzichtige brokken ijs, waarin methaan gevangen zit in microscopische kooitjes, gevormd door watermoleculen. Het methaan is ooit geproduceerd door ondergronds levende microben, die het methaan produceren uit organisch afval. Wanneer bij proefboringen een stuk hydraat naar boven komt, mogen de mensen op het scheepsdek er graag een vlammetje bijhouden: brandend ijs van de zeebodem. De gasinhoud van het hydraat is verbazend groot: uit 1 liter hydraat komt 168 liter methaangas vrij.

Gashydraten vormen zich onder hoge druk en lage temperatuur.De plaatsen waar gashydraten zijn aangetroffen liggen langs de randen van de continenten. Dat heeft echter meer te maken met de bereikbaarheid dan met specifieke omstandigheden. Ook middenin de oceanen zijn methaanhydraten te verwachten.

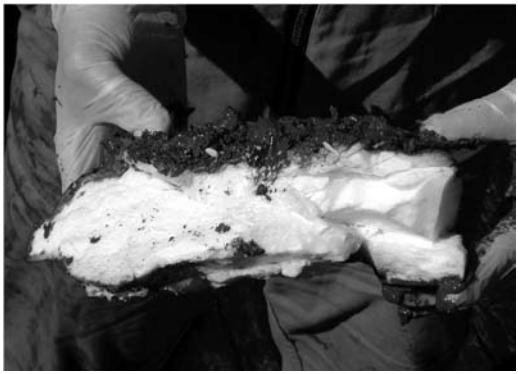

FIG.9 Proefboringen brengen gashydraat naar boven. Goud in handen?
- Foto: Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR 2002

De belangstelling op de conferentie in Edinburgh was niet puur academisch. Sommigen schatten dat de totale hoeveelheid methaanhydraat op de zeebodem twee keer meer energie bevat dan alle kolen, olie en aardgas bij elkaar. En de voorraden zijn in de buurt van landen die zelf geen andere energiereserves hebben, zoals Japan.

Maar het gashydraat is als een schatkist in een mijnenveld. Behalve een prettige brandstof is methaan namelijk ook een broeikasgas dat ruim 20 keer sterker werkt dan CO_2. Ontsnappend methaan zou het broeikaseffect ongekend kunnen versterken.

De winning van methaan uit gashydraat is dan ook bijna letterlijk spelen met vuur, want ongecontroleerd vrijkomen van methaan is nauwelijks te voorkomen. Vandaar dat tot voor kort er een consensus leek te bestaan dat het beter was er niet aan te komen. Aan dat moratorium lijkt een einde gekomen te zijn, nu Fugro samen met British Petroleum en Shell samen met de TU Delft al onderzoek verrichten met het oog op winning. Ook China heeft al 100 miljoen geïnvesteerd en Japan leidt de race met de aankondiging dat het in 2016 op commerciële basis methaan uit gashydraten wil winnen.

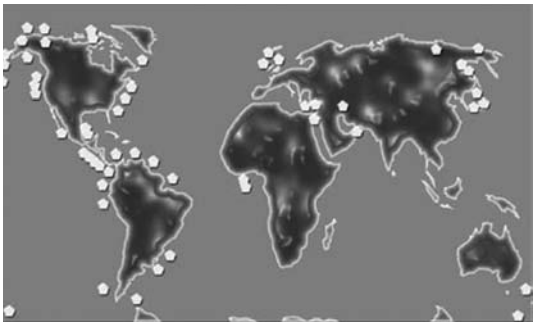

FIG.10 Waar gashydraten zijn aangetroffen. – Bron: NOAA Ocean explorer

Tegenhouden gaat dus niet meer. Is de winning dan tenminste nog te beheersen? Hydraathoogleraar Bahman Tohidi (Heriot Watt Universiteit, Edinburgh) zet de mogelijke winningmethoden in *The Independent* op een rijtje. 'Om gas vrij te krijgen, moet je de hydraten omzetten in water en gas. Eén techniek is om de druk te verlagen, een andere om de temperatuur te verhogen en een derde is om alcohol toe te voegen als een soort antivries.' [20] Alle drie de methoden zijn riskant omdat het ijs op enkele honderden meters onder het oppervlak een structureel deel van de zeebodem vormt. Los het op en de zeebodem stort in, waardoor methaan onbeheersbaar vrijkomt. Bovendien kunnen grootschalige verschuivingen van de zeebodem tot tsunami's leiden.

Instortende methaanhydraten zijn de meest waarschijnlijke oorzaak van de zogenaamde Storegga slides, de grootste landverschuivingen in de geschiedenis van de aarde. De laatste vond zo'n 8.100 jaar geleden plaats. De aardverschuiving had ten westen van de Noorse kust plaats, maar in Schotland zijn er sporen van teruggevonden: 80 kilometer landinwaarts en 4 meter boven de normale vloedniveau.

Om risico's te vermijden is er volgens Tohidi maar één goede manier van hydraatexploitatie: het methaan uitdrijven met CO_2. In de praktijk zou het er zo uitzien dat CO_2 naar de diepte gepompt wordt en daar het methaan uit de ijskooitjes drijft. Het methaan komt vrij en het kooldioxide blijft stabiel opgeslagen in de zeebodem achter. 'Zo sla je twee vliegen in één klap. Je bergt het CO_2 op en krijgt er methaan voor terug.'

Dat klinkt goed, maar wie garandeert dat er geen methaan ontsnapt bij de winning? Wie houdt toezicht op partijen die jacht maken op gashydraten, om te voorkomen dat ze goedkopere en riskantere technieken toepassen?

Houd berichten over gashydraten goed in de gaten, want gashydraten zijn zowel een grootse belofte als een catastrofale dreiging. Een gevaarlijke combinatie.

Beren op 't behang

Nieuwjaarsdag 2006 draaide Rusland de gaskraan naar Oekraïne dicht en tot ver in Europa zakte de gasdruk in de leidingen. Met de beste wensen van de buren.

De aanleiding was een prijsconflict met de voormalige Sovjetstaat. Rusland wilde een vijf maal zo hoge prijs voor zijn gas ontvangen. In plaats van de vriendenprijs van 42 euro per duizend kubieke meter, moest Oekraïne voortaan de marktprijs van 195 euro gaan betalen. Oekraïne weigerde dat – het wilde een overgangsregeling van vijf jaar om aan het nieuwe tarief te wennen – en Rusland stopte de leveranties. Maar de pijplijn naar West-Europa die door het land loopt voerde nog wel gas aan. Oekraïne besloot toen om gas voor eigen gebruik uit die leiding af te tappen. De Russische tegenzet was een complete stop van de gasexport richting Oekraïne.

Oostenrijk voelde de gevolgen vrijwel direct: een derde minder gas. Ook in Duitsland, Hongarije, Slowakije en Polen trad een drukvermindering in de gasleiding op. Rusland levert bijna de helft van het aardgas dat in de Europese Unie verbruikt wordt. Nederland werd niet direct getroffen dankzij de eigen aardgasvoorraden, maar Duitsland bereidde al wel een beroep voor op diezelfde Nederlandse reserves.

In de media en de politiek herleefde het schrikbeeld van de olieboycot uit 1973. Toen werd met name Nederland getroffen door de stopzetting van de olie-export vanuit Saoedi-Arabië en Koeweit. Wim Kan schetste de nationale ontreddering destijds in zijn oudejaarsconference met het lied 'Kamelen op 't behang' als nachtmerrie over de afhankelijkheid van vreemde mogendheden. Het nieuwe jaar 2006 begon met een variatie hierop met de Russische beer in plaats van Saoedische kamelen. Anders, maar niet minder bedreigend.

Een jaar later was het weer raak. Op 8 januari 2007 werd de olieexport door Wit-Rusland stopgezet, waardoor Polen en Duitsland geen olie meer ontvingen uit de *Droezjba* (vriendschap) oliepijplijn. Weer was een eenzijdige prijsverhoging de oorzaak. In december 2006 ging Wit-

Rusland zeer tegen zijn zin akkoord met de dubbele gasprijs (100 dollar per 1000 kubieke meter) die de Russen eisten. Op 1 januari 2007 ging ook de olieprijs omhoog. Wit-Rusland eiste toen ook een extra vergoeding voor het transport naar West-Europa. Toen Rusland daar niet op in ging, besloten de Wit-Russen zelf maar belasting te innen door olie af te tappen uit de *Droezba*-lijn. Daarop draaide olie-exporteur Transneft de kraan dicht. Einde vriendschap.

Rusland is een grootleverancier van zowel gas als olie aan de Europese Unie. Olie en gas uit Rusland maken 25 respectievelijk 40 procent uit van de Europese energie-import.[21] Omgekeerd verkoopt Rusland momenteel 70 procent van zijn olie en 85 procent van zijn gas aan Europa. Rusland is een ware grootmacht op het gebied van energie. Het land heeft 130.000 oliebronnen in gebruik en er zijn 2000 olie- en gasvelden ontdekt waarvan er minimaal 900 nog niet in gebruik zijn.[22] De totale olievoorraad wordt geschat op 150 miljard vaten, wat vergelijkbaar is met Irak. De reserves zijn wellicht nog veel groter, maar het barre klimaat in het noorden heeft exploitatie lang in de weg gestaan. Met een stijgende olieprijs van meer dan 60 dollar per vat, wordt het economisch haalbaar om ook daar olie te winnen. Daarnaast zijn Russische gasvoorraden zijn de grootste ter wereld. Shell werkt sinds 2005 in West-Siberië aan exploitatie van het gasveld Zapoljarnoje ('Zapo' voor medewerkers) en de olie- en gasvelden van Salym.

Ook bouwt Rusland aan een ongekend pijpleidingennet om olie en gas te exporteren. Niet alleen naar het westen, maar vooral ook naar het oosten. In het voorjaar van 2006 verklaarde president Poetin dat Rusland zich meer oostwaarts zou gaan richten omdat de groeiende economie daar een interessante afzet belooft. Omstreeks 2010 zal er jaarlijks tachtig miljard kubieke meter aardgas naar China stromen, twee keer zoveel als nu, door twee nieuwe pijpleidingen. Daarnaast moet er een olieleiding komen van Siberië naar China en Japan die 1,6 miljoen vaten ruwe olie per dag transporteert. De *East-Siberian-Pacific Ocean* (ESPO) pijpleiding kost meer dan 11,5 miljard euro en wordt aangelegd door de staatsonderneming Transneft. De leiding kan nog verder doorgetrokken worden naar Noord- en Zuid-Korea. Waarnemers zien hierin een duidelijke strategie voor een nieuwe energiesamenwerking tussen Rusland en de groeiende Aziatische economieën.

Tegelijk worden er ook twee nieuwe pijpleidingen naar het westen gebouwd. In het noorden is dat de *North European Gas Pipeline* (NEPG) die 1200 kilometer lang onder de Baltische zee loopt en de Russische

havenstad Vyborg nabij Sint Petersburg verbindt met de stad Greifswald in Duitsland. De gasleiding wordt gerealiseerd door een consortium van het Russische staatsbedrijf Gazprom (51 procent) en de Duitse bedrijven BASF en E.on (ieder 24,5 procent). Het besluit tot de aanleg was in maart 2006 de laatste daad van bondskanselier Gerhard Schröder, die na zijn aftreden tot voorzitter van het consortium werd benoemd. Polen en Oekraïne protesteerden tegen de aanleg. De Polen omdat ze een te grote afhankelijkheid van de Russen vreesden en de Oekraïeners omdat ze hun troef dreigden kwijt te raken: de gasleiding door de Oekraïne die gas doorvoert naar Europa en die het land gedurende de kerst van 2005 ondanks de Russische boycot toch nog even warm hield. In het vervolg kan Rusland bij escalerende conflicten de gaskraan resoluut dichtdraaien zonder dat daarbij de gasuitvoer naar het goedbetalende Europa in gevaar komt.

Nog een andere gasleiding is in aanbouw naar Zuid-Europa. De zogenaamde *Blue Stream*-gaspijpleiding loopt van de gasvelden in Krasnodar onder de Zwarte Zee door naar de Turkse kust. In 2010 moet de gasleiding op volle sterkte zijn. Hij vervoert dan 16 miljard kubieke meter per jaar. Gazprom onderhandelt ondertussen met Griekenland, Zuid-Italië en Israel over nieuwe gasleveranties. De *Blue Stream* gasleiding zou daarvoor doorgetrokken moeten worden over Turks grondgebied.

Dat klinkt allemaal erg genereus, maar af en toe toont de Russische beer zijn tanden. Dat gebeurde september 2006 toen Rusland plotseling de vergunning opzegde aan Shell voor aardgaswinning op het schiereiland Sachalin aan de Russische oostkust. Rusland trok de milieuvergunning in en daarmee stond Sachalin II, het grootste energieproject ter wereld, plots op losse schroeven. Shell werkte er samen in een consortium met de Japanse bedrijven Mitsui en Mitsubishi en wilde er 20 miljard dollar investeren in het opzetten van een installatie die aardgas vloeibaar maakt (*LNG: liquid naturel gas*) om het vervolgens te verschepen naar Japan, Korea en de Verenigde Staten. Het project biedt werkgelegenheid aan 17.000 mensen en is voor 80 procent gereed. In 2008 zou het project de eerste leveringen kunnen doen. In 2003 had Shell een milieuvergunning gekregen, maar die werd plotseling ongeldig verklaard vanwege vermeende milieudelicten. Wie een beetje op de hoogte is van de olielekkages in Siberië door Russische bedrijven, fronst zijn wenkbrauwen over de aanklacht tegen Shell. Er moest iets anders aan de hand zijn.

Dat vermoeden werd alleen maar groter toen ook het Sachalin I-project werd stopgezet vanwege het milieu. ExxonMobil werkte er aan een olieterminal als deel van de exploitatie van de olie- en gasvelden onder het schiereiland. Maar liefst acht miljard vaten olie en een enorme hoeveelheid gas hadden investeerders naar deze plaats toe gelokt.

FIG.11 Shell boorplatform voor de kust van Sachalin. – Foto: Shell

Dat was in 1990 geweest onder het presidentschap van Boris Jeltsin. Rusland zat financieel aan de grond en had buitenlandse investeerders en technologie nodig om de immense olie- en gasvoorraden te gelde te maken. In een buitensporig gulle bui had Jeltsin Amerikaanse en andere firma's exploitatierechten geboden voor twee grote energieprojecten: Sachalin I en II. De voorwaarden waren bijzonder gunstig en staan bekend als PSA of *Production Sharing Agreement*. Dat is een type overeenkomst dat vaak met ontwikkelingslanden wordt gesloten die zelf niet over middelen beschikken om te investeren. Onder de PSA-overeenkomst wordt dan bepaald dat het land pas mee gaat delen in de opbrengsten als de investeringskosten zijn terug verdiend.

Die overeenkomst zat Poetin waarschijnlijk al niet lekker. Toen ExxonMobil op de vooravond van de opening van de olieterminal in De Kastri liet weten dat de kosten 30 procent hoger uitgevallen waren dan geraamd, begrepen de Russen dat ze nog langer op hun geld zouden moeten wachten. Daarop liet het Russische ministerie van milieu weten dat de terminal niet aan de eisen voldeed en dat de vergunning was ingetrokken.

In december 2007 volgde voor Shell een bittere ontknoping. Shell moest zijn meerderheidaandeel van 55 procent opgeven ten gunste van Gazprom, die 51 procent van de aandelen verwierf en Shell daarvoor 5,6 miljard euro betaalde. Over milieuvergunningen geen woord vanuit het Kremlin. 'We komen nog goed weg,' verklaarde Shell-topman Jeroen van der Veer op 21 december 2006 in Trouw. Op de vraag wat voor les hij geleerd had, antwoordde Van der Veer: 'Zorg altijd voor een Russische partner bij grote projecten.'

Een week later (30 december 2007) lekte een geheim protocol uit dat aan het akkoord met Gazprom was toegevoegd: de kostenoverschrijding van 2,5 miljard euro die het project had opgelopen kwamen voor rekening van Shell, Mitsui en Mitsubishi. Gazprom hoeft er niet in bij te dragen. De Russische media noemden de overeenkomst 'het kerstcadeau voor Gazprom.'

De Amerikanen zijn al niet veel zachtzinniger als het om toegang tot energiebronnen gaat. Volgens de Amerikaanse hoogleraar economie Jeffrey Sachs (Columbia University, New York) was olie de belangrijkste drijfveer voor de Irakoorlog in april 2003. Of beter: controle over de olieprijs. 'Voor de oorlog tegen Irak leek alles simpel op het gebied van energie,' legt hij uit in een interview met *de Volkskrant*. 'De Verenigde Staten zouden Saddam Hussein afzetten, de grote oliereserves van Irak zouden na een korte periode van wederopbouw weer vrij komen (na het exportverbod aan het einde van de eerste Golfoorlog, dat later verzacht werd onder het motto 'olie voor voedsel'), en de olieprijzen op de wereldmarkt zouden dalen tot onder de 20 dollar per vat. In plaats daarvan zijn de olieprijzen sterk gestegen tot 35 dollar per vat.'[23]

Sachs beschrijft hier wat econoom en publicist Frederick William Engdahl de Cheney-strategie noemt, naar de Amerikaanse vice-president naast George W. Bush. Die strategie betekent een Amerikaanse buitenlandse politiek die erop gericht is directe controle te verwerven over de wereldenergievoorraad door die onder de hoede te brengen van de grote vier Amerikaanse (of Amerikaans gelieerde) oliefirma's: Chevron Texaco, ExxonMobil, of BP. Die controle gaat volgens Engdahl gepaard met militaire macht. Het is volgens hem geen toeval dat de regering Bush-Cheney gesteund wordt door een coalitie van de oliefirma's en de wapenindustrie.

In zijn boek *'Century of War: Anglo-American Oil Politics en the New World Order'* laat Engdahl zien hoe Amerika stelselmatig aan de randen van Rusland knabbelt. Afghanistan, Irak, Iran en Noord-Korea maken

allemaal deel uit van de 'As van het Kwaad' en zijn daarmee een (potentieel) militair doelwit. Ondertussen bouwt Rusland verder aan zijn basis als energienatie. Volgens Engdahl is Amerika erop uit de Russische energiereus op de knieën te dwingen om ook die energievoorraden te beheersen. Zoals blijkt uit de titel van zijn boek, gelooft Engdahl niet dat het gevecht om de energievoorraden vredig zal verlopen.

Binnenkort zal de piek in de olieproductie zich ook in het Midden-Oosten aandienen. Misschien duurt het nog tien jaar, misschien zijn we er al overheen. Zeker is dat de vraag alleen maar zal groeien met aantrekkende economieën in China, India en Brazilië. 'Als het Midden-Oosten nu al op instorten staat, stel je voor wat er zal gebeuren als de strijd om olie uit het Midden-Oosten nog harder wordt, tussen Amerika, Europa, China, India, Japan en anderen,' zegt Jeffrey Sachs.

Die ontwikkelingen waren voor Zweden de aanleiding om onafhankelijk te willen worden van energie-import. 'Een land moet zonder olie kunnen,' verklaarde de Zweedse premier Göran Persson stoer en gaf de aftrap voor een onderzoeksprogramma om brandstoffen te vervaardigen uit de zwarte smurrie die als bijproduct ontstaat bij de fabricage van papier en pulp. Daarnaast wordt ook alle geconfisqueerde drank omgezet in brandstof.

Opmerkelijk genoeg liet president Bush in zijn *State of the Union* van 2006 een soortgelijk geluid horen. Hij riep zijn *great nation* op om de afhankelijkheid van olie te verminderen. In 2025, zo stelde Bush, zou 75 procent van de olie uit het Midden-Oosten vervangen moeten zijn door schone energie.

In maart 2007 voegde Bush de daad bij het woord en bezocht een aantal Zuid-Amerikaanse landen, waaronder Brazilië, 's werelds grootste producent van biobrandstof ethanol. Op 10 maart tekenden de grootste landen van het continent, de VS en Brazilië een samenwerkingscontract op het gebied van biobrandstof. 'We hebben de wereld zoveel vervuild, dat we in de eenentwintigste eeuw moeten proberen te ontgiften,' aldus de Braziliaanse president Lula da Silva. Voor VS president Bush ging het vooral om de vermindering van de afhankelijkheid van het Midden-Oosten: 'Afhankelijkheid van energie die ergens anders vandaan komt, betekent dat je van beslissingen elders afhankelijk bent. En dus als we op ethanol gaan rijden in plaats van benzine, worden we minder afhankelijk van olie-import.'[24]

Voor een klein en vol land als Nederland is het ondoenlijk om energetisch onafhankelijk zal worden. Bovendien neemt onze afhankelijk-

heid van Russisch gas in de komende jaren alleen maar toe omdat de eigen productie begint af te vlakken. Nederland betrekt momenteel ongeveer 37 procent van zijn energie uit geïmporteerde olie, 44 procent uit gas, waarvan vier vijfde uit eigen bodem afkomstig is en 10 procent uit geïmporteerde kolen.[25] We zijn dus voor meer dan de helft van onze energie afhankelijk van import, voornamelijk uit het Midden-Oosten en Rusland. Energiebesparing en duurzame energiebronnen zijn de enige manieren om in de toekomst minder kwetsbaar te worden in plaats van meer.

De waterstofdroom

'Ja, vrienden, ik geloof dat water eens gebruikt zal worden als brandstof, dat de bestanddelen waterstof en zuurstof, alleen of samen gebruikt, een onuitputtelijke bron van licht en warmte zullen vormen, met een intensiteit waar steenkool niet aan kan tippen. Water zal de steenkool van de toekomst zijn.' Dat schreef Jules Verne in 1874 in zijn boek *Het Geheimzinnige Eiland*.

128 Jaar later schreef Jeremy Rifkin het boek *The Hydrogen Economy* waarin hij betoogt dat de waterstofeconomie van Jules Verne voor de deur staat. Als de olie op is, gaan we over op waterstof. Waterstof is een universele en ideale brandstof, want bij de verbranding komt alleen waterdamp vrij en geen CO_2.

Waterstof wordt gewonnen uit water door er stroom doorheen te leiden, waardoor H_2O ontleedt in H_2 en O_2, waterstof en zuurstof.[26] Het proces heet hydrolyse, letterlijk: het ontleden van water. De stroom voor de hydrolyse komt in Rifkins scenario uit allerlei duurzame bronnen zoals windenergie, waterkrachtcentrales, aardwarmte, zonne-energie en biomassa. Door de elektriciteit van windmolens om te zetten in waterstof is de energie op te slaan, en kan de wisselvalligheid van de wind gecompenseerd worden. Waterstof is in de visie van Rifkin een universele energiedrager. Alle soorten energie kunnen omgezet worden in waterstof, en waterstof kan op elk gewenst moment omgezet worden in stroom.

De omzetting van waterstof in stroom gebeurt met een brandstofcel, waarin het omgekeerde proces plaatsvindt van hydrolyse: waterstof en zuurstof worden in de cel met elkaar in contact gebracht en wat uit de

brandstofcel komt, is water en elektriciteit.[27] De cirkel is rond. Eén van de eerste gebruikers van de brandstofcel waren astronauten die een deel van hun brandstof (waterstof en zuurstof) daarmee omzetten in elektriciteit voor de boordapparatuur en in drinkwater.

In het visioen van Rifkin wekken brandstofcellen thuis stroom op voor eigen gebruik. Ook auto's zullen uitgerust zijn met 20 kilowatt brandstofcellen. Uiteindelijk staan er zoveel kleine elektriciteitscentrales in bedrijven, woonhuizen en auto's dat de grote elektriciteitscentrales overbodig worden, denkt Rifkin. Decentrale opwekking is dan het toverwoord. Lokale opwekkers van energie staan via intelligente regelinstallaties in contact met gebruikers waardoor een zelfregelend, flexibel stroomnet ontstaat. *Power to the People* noemt Rifkin dat. Hij voorziet een herstructurering van het stroomnet naar een *Hydrogen Energy Web*. Een ontwikkeling analoog aan de internetrevolutie, waar grote *mainframe* computers plaats hebben gemaakt voor miljoenen kleine computers die oneindig flexibel met elkaar in verbinding staan via het internet.

De grootste valkuil van de waterstofdroom is de waterstof zelf. Waterstof is namelijk geen energiebron, maar een energiedrager. Want hoewel waterstof het meest voorkomende element in het heelal is, komt het op aarde in ongebonden vorm nauwelijks voor. Het moet daarom altijd gemaakt worden uit een andere energiebron. En dat is bijna nooit via hydrolyse (4 procent van de totale productie), omdat dat een relatief dure manier is om waterstof te produceren, waarbij bovendien ongeveer de helft van de elektrische energie verloren gaat. Verreweg de meeste waterstof wordt uit aardgas gewonnen, of uit steenkool. Daarbij komt wel degelijk CO_2 vrij. De verbranding van waterstof is weliswaar schoon, maar de CO_2-uitstoot vindt ergens anders plaats. Rifkin ziet dat als aanloopproblemen. Als straks de fossiele bronnen op zijn, dan wordt waterstof vanzelf CO_2-vrij, redeneert hij.

Verder is de opslag van waterstof problematisch. Het gas is zo licht dat het onder zeer hoge druk (meer dan 100 atmosfeer) samengeperst moet worden om op een beetje redelijk formaat tank uit te komen. Overigens kost dat samenpersen ook weer energie. Vloeibaar maken door afkoelen is ook geen praktische optie, want dat gebeurt pas bij –252 graden Celsius. Het minste warmtelek zorgt er dan voor dat de waterstof uit de tank na een weekje in de garage volledig verdampt is.

Niettemin werkt de waterstofdroom inspirerend en vrijwel ieder groot automerk heeft wel een waterstofauto met brandstofcellen in ontwikkeling. Brandstofcellen zelf zijn gewoon in de handel en vertonen een gestage prijsdaling. Verder wordt er onderzoek gedaan naar geschikte opslagmogelijkheden van waterstof in hogedruktanks of in slimme molecuulroosters en geschikte oplosmiddelen.

Eén land heeft al verklaard de waterstofstaat van de wereld te willen worden. De eerste waterstofpomp werd er op 24 april 2003 in werking gesteld: Reykjavik, IJsland. Het vulkanische eiland zwemt in de aardwarmte en in de daarmee opgewekte elektriciteit. Bovendien is import van fossiele brandstof door de afgelegen ligging extra duur. IJsland is dus uiterst gemotiveerd voor de 'steenkool van de toekomst'. Het vulkanische eiland wil niet alleen onafhankelijk worden van olie-import, het wil zelf energie-exporteur worden voor Europa.

Kosten van het klimaat

In oktober 2006 promoveerde het rapport *Stern Review: The Economics of Climate Change* van econoom Nicholas Stern het klimaatvraagstuk van een wetenschappelijk discussieonderwerp tot een keiharde economische factor. De voormalige hoofdeconoom van de Wereldbank had, in opdracht van de Britse overheid, een jaar lang met een team van twintig topambtenaren en wetenschappers gewerkt om de kosten van klimaatverandering te specificeren en te berekenen. Stern kwam tot de conclusie dat grootscheepse investeringen nodig zijn in de energievoorziening. Hij schat de benodigde investeringen op 1 procent van het wereldwijde bruto inkomen. Als die investeringen uitblijven, zo waarschuwde hij, dan krijgen we later de rekening gepresenteerd in de vorm van overstromingen, droogtes, mislukte oogsten en sociale ontwrichting. De kosten daarvan kunnen oplopen tot 5 of zelfs 20 procent van het globale brutoinkomen. 'We hebben de tijd en de kennis om er iets aan te doen,' vatte Stern zijn rapport *Stern Review* samen, 'maar alleen als we internationaal, krachtig en snel in actie komen.'

Volgens de Nederlandse Nobelprijswinnaar Paul Crutzen – hij verdiende de prijs met zijn ontdekking dat chloorfluorkoolwaterstoffen de ozonlaag in de bovenste atmosfeer afbreken – leven wij in een zelfgemaakt klimaat. Na het Pleistoceen en het Holoceen is volgens Crutzen nu het Antropoceen aangebroken, de tijd waarin de menselijke invloed op het klimaat grote vormen heeft aangenomen en de natuurlijke effecten overschaduwt. Als beginpunt van het Antropoceen neemt Crutzen de helft van de achttiende eeuw met de groeiende toepassing van de stoommachine. Vanaf die tijd is het gebruik van fossiele brandstof exponentieel gestegen en daarmee de uitstoot van kooldioxide, het voornaamste broeikasgas.

Het broeikaseffect is het verschijnsel dat de aanwezigheid van bepaalde gassen de temperatuur op aarde hoger maakt dan bij een lagere concentratie het geval zou zijn. Zonder het broeikaseffect zou het op aarde gemiddeld – 18 graden Celsius zijn, nu is dat 15 graden. De

opwarming door zogenaamde broeikasgassen wordt veroorzaakt doordat die gassen wel zichtbaar licht doorlaten, maar infrarode warmtestraling absorberen. Zonder broeikaseffect zou de Aarde nauwelijks bewoonbaar zijn, maar de zorg over de klimaatverandering berust op het versterkte broeikaseffect, door sterke toename van broeikasgassen in de atmosfeer. CO_2 is daarvan de bekendste, maar methaan (CH_4) en lachgas (N_2O) hebben een 23 respectievelijk 296 keer sterker effect. De concentraties daarvan in de atmosfeer zijn wel een stuk lager, waardoor de werking van CO_2 toch het belangrijkst is.

Het broeikaseffect werd al meer dan honderd jaar geleden ontdekt, al was het in een heel andere context. In die tijd hield men zich in Zweden bezig met de vraag waarom de wereld afkoelt tijdens een ijstijd. Uit geologisch onderzoek was gebleken dat heel Scandinavië duizenden jaren onder een dikke laag ijs had gelegen, maar men begreep eigenlijk niet waardoor dat kwam. De Zweedse chemicus Svante Arrhenius (1859–1927) had het idee dat die afkoeling een gevolg kon zijn van een veranderende samenstelling van de atmosfeer. Uit het werk van de Ierse natuurkundige John Tyndall en de Franse wiskundige Jean Baptiste Fourier een halve eeuw eerder wist hij dat sommige gassen zonnewarmte konden opnemen. Tyndall had er zelfs metingen aan gedaan. Het principe is dat gassen als kooldioxide transparant zijn voor zichtbaar licht, maar dat ze infrarode warmtestraling absorberen. Arrhenius had bedacht dat wanneer de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer om welke reden dan ook minder zou worden, de atmosfeer dan minder warmte zou vasthouden en de temperatuur op aarde zou dalen. Hij had echter nooit tijd gevonden om die theorie uit te werken.

Maar in december 1894 liep het huwelijk met zijn assistente Sofia op de klippen en Svante Arrhenius dreigde in de donkere poolwinter in een diepe depressie te raken. In plaats daarvan koos hij voor afleiding en begon op kerstavond aan een rekenklus die hem meer dan een jaar zou kosten. Hij wilde uitrekenen of een vermindering van atmosferisch CO_2 inderdaad een temperatuurdaling tot gevolg zou hebben, en hoeveel die dan bedroeg. De berekening van de hoeveelheid warmte die de atmosfeer vast kon houden bij verschillende CO_2-concentraties was nog betrekkelijk simpel. Daarvoor kon hij de formules van Tyndall en Fourier gebruiken. Het ingewikkelde deel was de berekening van de warmteabsorptie van de aarde. Die varieert tussen 20 procent of minder voor ijs en 80 procent voor de oceanen. Woestijnen, bossen, meren en graslanden hebben waarden daar tussenin. Er zat dus niets anders op

dan op basis van een atlas de hele aarde in kleine vierkantjes te verdelen en van elk daarvan de reflectie en absorptie te berekenen. Bovendien moest hij rekening houden met hoe smelten of bevriezen van bepaalde gebieden de warmtehuishouding zou beïnvloeden.

Na een jaar rekenen had Arrhenius een serie temperatuurvoorspellingen voor gebieden met verschillende noorderbreedte en in de vier seizoenen als functie van het CO_2-gehalte in de atmosfeer. Hij kon laten zien dat als de hoeveelheid CO_2 met de helft of een derde afnam, dat de aarde dan 4 tot 5 graden kouder zou worden, voldoende om Scandinavie en een flink deel van Midden-Europa onder het ijs te doen verdwijnen. 'Ongelofelijk dat zo'n onnozel onderwerp me zo lang heeft beziggehouden,' merkte hij later op tegenover een vriend.

Maar de uitkomst was verre van onnozel. Hij kon nu ook berekenen wat het gevolg zou zijn van een dubbele hoeveelheid CO_2: een temperatuurstijging van 5 tot 6 graden. Meer dan honderd jaar later kwam het IPCC in 2007 dankzij de medewerking van honderden onderzoekers en de meest geavanceerde computers op 2,8 tot 3,2 graden Celsius voor twee keer de pre-industriële hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer, waarbij het pre-industrieel gehalte aan CO_2 280 ppm (deeltjes per miljoen) bedroeg.[28]

Overigens was de interpretatie van Arrhenius wel heel anders dan die van het klimaatpanel. Toen hij besefte dat verbranding van kolen de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer verhoogt, verheugde hij zich op een aangenamer klimaat. 'We verheugen ons op tijden met een gelijkmatiger en beter klimaat, in het bijzonder voor de koudere gebieden op aarde, tijden wanneer de aarde grotere oogsten oplevert voor het welzijn van een snel groeiende bevolking.' Maar, voegde hij eraan toe, helaas zou het nog wel duizend jaar kunnen duren voor het zover was.

Toen hij in het begin van de twintigste eeuw het gebruik van fossiele brandstoffen sterk toe zag nemen, vreesde Arrhenius dat de brandstof op zou zijn voordat het klimaat ervan zou profiteren. In 1903 ontving Arrhenius de Nobelprijs voor de scheikunde voor een heel ander onderwerp (de elektrische geleidbaarheid van zoutoplossingen) en zijn atmosferische werk raakte in de vergetelheid. Het zag er toen niet naar uit dat zijn werk ooit praktische gevolgen zou hebben. Daarvoor was het gebruik van fossiele brandstoffen in de eerste helft van de twintigste eeuw veel te gering.

Dat beeld is nu veranderd dankzij het werk van een andere klimaatpionier: Charles David Keeling. Hij begon als student aan het Scripps instituut voor Oceanografie (La Jolla, Californië) in de jaren vijftig aan een project dat zijn leven lang zou duren en dat een halve eeuw later door het instituut 'de belangrijkste milieumetingen van de twintigste eeuw' werd genoemd. Keeling heeft de ademhaling van de aarde gemeten en hij heeft laten zien dat de aarde het steeds benauwder krijgt.

Hij begon zijn metingen van de CO_2-concentratie in de heuvels van het Yosemite natuurpark waar hij graag wandelde. Later, in 1958, ging hij ervoor naar Hawaii, in de hoop op de 4200 meter hoge vulkaantop van Mauna Loa, waar ook een observatorium gevestigd is, betere metingen te krijgen door de schone lucht aldaar. Keeling nam zijn taak van de metingen om de vier uur zo serieus, dat hij de geboorte van zijn eerste kind daardoor miste.

FIG.12 Dave Keeling bij zijn meetresultaten. - Foto: Scripps Oceanography

Al snel bleek zijn moeite niet voor niets. De metingen wezen een gemiddeld niveau van 315 deeltjes CO_2 per miljoen aan (aangegeven door de maat ppm, kort voor: *parts per million*). Maar om het gemiddelde niveau heen trad een seizoensvariatie op. In de lente komt de natuur tot leven, bladeren groeien aan de bomen en nemen CO_2 op uit de lucht waardoor de concentratie iets (4 ppm) zakt. In de herfst en winter komt de fotosynthese vrijwel stil te staan en breken dieren, bacteriën en schimmels organisch materiaal af en geven daarbij CO_2 af aan de atmosfeer.

Omdat de meeste vegetatie op het noordelijk halfrond staat, neemt de CO_2-concentratie in de zomer af, en stijgt weer in de winter. Keeling had de jaarlijkse ademhaling van de aarde gemeten.

Maar onder die jaarlijkse variatie ontdekte Keeling al na enkele jaren een stijgende trend, die hij toeschreef aan het gebruik van fossiele brandstof. Later schreef hij hierover: 'Begin 1962 was het mogelijk om af te leiden dat ongeveer de helft van de CO_2 van fossiele verbranding zich ophoopt in de lucht.' De rest werd opgenomen door de natuur.

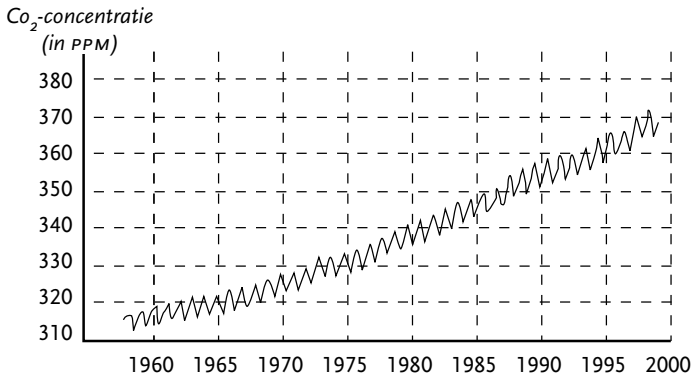

FIG.13 De Keelingcurve. – Bron: University of California, San Diego

De stijgende trend werd in de jaren erna alleen maar bevestigd. Sterker nog: de stijging leek steeds sneller te gaan. Van 315 ppm in 1958 naar 338 ppm in 1982 (25 ppm in 26 jaar) naar 380 ppm in 2006 (42 ppm in 26 jaar). Charles Keeling was er de man niet naar om hoog van de toren te blazen, maar in het jaar voor zijn dood in 2005 heeft hij toch alarm geslagen. Het was namelijk voor het eerst in vijftig jaar dat in twee achtereenvolgende jaren (2002 en 2003) het basisniveau van CO_2 met meer dan 2 ppm per jaar was gestegen. Keeling waarschuwde dat dit kon betekenen dat de natuurlijke buffers (bossen, bodem en oceanen) hun grens hadden bereikt. Hij vreesde dat de natuur de opgeslagen CO_2 nu langzaam terug zou gaan geven aan de atmosfeer, iets wat een verdere versnelling van het broeikaseffect in de hand zou werken.

Hoe uniek de huidige situatie is, blijkt ook uit een diagram uit het vierde rapport van de IPCC dat in februari 2007 uitkwam. Het is een soort Keelingcurve met een tijdas die 10.000 jaar teruggaat in de tijd. Voor 1960 is de concentratie van CO_2 bepaald door analyse van luchtbelletjes in ijskernen.

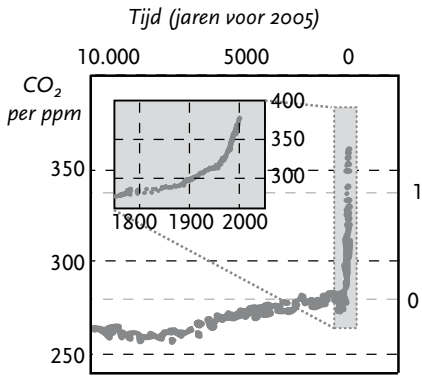

FIG.14 De Keeling-curve in geologische context. Stijging van CO_2 begint langzaam in de loop van de achttiende eeuw. - Bron: IPCC rapport 2007

De uiteindelijke gevolgen van die verhoogde kooldioxideconcentraties zijn onbekend. De temperatuur gaat omhoog, zoveel is duidelijk. Maar de paradijselijke voorstelling van Arrhenius die in het koude Zweden droomde van een milder en een gelijkmatiger klimaat, wordt tegenwoordig door weinigen gedeeld. In het geologisch verleden blijkt een klimaatverandering meestal tamelijk snel en abrupt te verlopen, met uitstervingen van diersoorten.

'Het klimaat is een slapend beest,' waarschuwt geochemicus Wallace S. Broecker van het Lamont-Doherty aardobservatorium van de Columbia Universiteit in New York. ' We porren het wakker door de uitstoot van broeikasgassen.' Wanneer het beest wakker wordt en uithaalt, durft niemand te voorspellen. Maar vanuit onderzoek van sedimenten uit Californië en ijskernen uit Groenland is wel bekend dat klimaatsprongen zich snel en drastisch kunnen voltrekken. Temperatuur en neerslagpatronen veranderen dan totaal in enkele tientallen jaren. In het ijs van Groenland zijn temperatuursprongen van 6 tot 8 graden binnen enkele decennia te zien. Ter vergelijking: het huidige broeikaseffect heeft de gemiddelde temperatuur in vijftig jaar met 0,6 graden verhoogd. Broecker weet niet zeker wat zo'n dramatische klimaatverandering teweeg kan brengen. 'Wat het ook is, het is wereldwijd en het is immens.'[29] Maar hij heeft wel een vermoeden.

Veranderingen in de oceaanstromingen zouden de oorzaak kunnen zijn. Het klimaat kan volgens Broecker in bepaalde modi functioneren. Overschakeling van de ene modus op de volgende is echter geen geleidelijk proces, maar een sprong. De drijvende kracht achter zo'n sprong, vermoedt Broecker, zijn veranderingen in oceaanstromingen. Oceaanstromingen transporteren enorme hoeveelheden warmte over de wereld. De Golfstroom, die warm water vanuit de Caraïben naar West-Europa vervoert, is daarvan het meest bekende onderdeel. Maar in werkelijkheid is de Golfstroom slechts een onderdeel van een wereldwijde lus van oceaanstromingen. Het af- of aanschakelen van onderdelen daarvan kan enorme gevolgen hebben voor het klimaat. De kans is groot dat het klimaat na zo'n sprong in het duister veel minder gunstig is voor de mensheid dan het huidige.

In de speelfilm *The Day after Tomorrow* stopt de Golfstroom waardoor Noord-Amerika en Europa in een nieuwe IJstijd belanden. Voor wie dacht dat zoiets alleen in de film kan, is er slecht nieuws: onderzoekers van het Nationaal Oceanografisch Centrum in Southampton, Engeland, publiceerden in 2005 dat de Golfstroom tussen 1957 en 2004 met 30 procent was afgeremd. Het IPCC-rapport 2007 vermeldde dit resultaat niet omdat 'er onvoldoende bewijs is om vast te stellen of er zo'n afremmende trend bestaat.'[30]

'We moeten het beest niet teveel meer porren,' houdt Broecker zijn publiek voor. We lopen het risico dat de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer een onbekende grens overschrijdt, en dat we een onomkeerbare klimaatsprong in gang zetten. 'Met iedere volle tank voegen we 130 kilo kooldioxide toe aan de atmosfeer. Wat voor risico lopen we als we zo doorgaan?' vraagt Broecker. Hij heeft het dan overigens wel over Amerikaanse auto's.

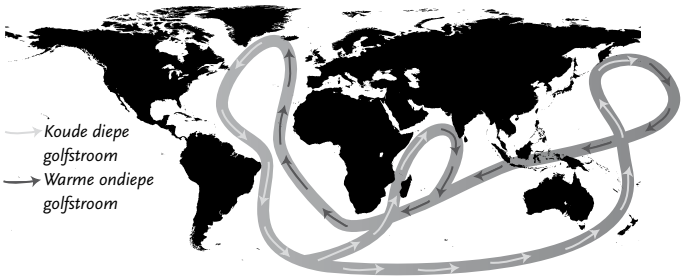

FIG.15 Warmtetransport door de oceanen volgens Wallace Broecker in 1987. – Illustratien door Crisja Ran

Over het algemeen neemt men aan dat een temperatuurstijging van 2 graden nog acceptabel is, en dat de kans op drastische klimaatsprongen dan gering is. De huidige opwarming bedraagt 0,6 graden en door de traagheid van het klimaatsysteem komt daar gegarandeerd nog 0,6 graden bij. Ook als we morgen opeens allemaal CO_2-vrij zouden gaan leven.

Twee graden temperatuurstijging hangt samen met het equivalent van 450 ppm kooldioxide. Maar er zijn ook andere broeikasgassen in het spel, zoals methaan, dus het best zou het CO_2-niveau de 400 ppm niet moeten overschrijden. Dat zou de meest veilige optie zijn, maar we zaten in 2006 al op 380 ppm en er was nog geen vermindering in uitstoot te bespeuren. Integendeel.

In zijn boek *The Last Generation* geeft wetenschapsjournalist Fred Pearce een heldere samenvatting[31] van de huidige situatie. Tijdens de laatste ijstijd, schrijft hij, bevatte de atmosfeer 400 miljard ton koolstof in de vorm van CO_2.[32] Aan het einde van de ijstijd kwam er vanuit de oceanen 200 miljard ton bij, zodat het uitgangsniveau aan het begin van de industriële revolutie – het zogenaamde pre-industriële niveau – 600 miljard ton atmosferische koolstof bedroeg. Dat komt overeen met een concentratie van 280 ppm. Na twee eeuwen industriële activiteit heeft de mensheid er 200 miljard ton aan toegevoegd, waardoor de totale hoeveelheid momenteel 800 miljard ton bedraagt, een concentratie van 380 ppm. Als we de veilige kant willen aanhouden, moeten we onder de 850 miljard ton blijven (400 ppm), dus hebben we nog 50 miljard ton te gaan. Jaarlijks gaat er 7,5 miljard ton CO_2 de lucht in door menselijk toedoen. Iets meer dan 40 procent hiervan wordt opgenomen door bossen en oceanen, zodat we een nettobijdrage van ongeveer 4 miljard ton per jaar overhouden. De limiet van 50 miljard ton erbij gaan we dus – zelfs als we uitgaan van een gelijkblijvende emissie – over iets meer dan tien jaar halen.

De vraag is wanneer de stijgende lijn in de Keeling-curve afvlakt, en op welk niveau de concentratie dan staat. Experts schatten in dat de menselijke emissie tot een kwart van het huidige niveau teruggebracht moet worden, voordat de natuur kan opnemen wat de mensheid uitstoot. Dat is een voorwaarde voor een evenwichtssituatie.

Een vermindering van de CO_2-uitstoot met driekwart is ronduit revolutionair. Vergelijk dat eens met het Kyoto-protocol dat in 1997 werd opgesteld en waarin de 55 ondertekenende landen zich verplichtten de uitstoot van broeikasgassen met gemiddeld 5 procent te verminderen

ten opzichte van 1990. Voor Nederland betekent dat een reductie van 6 procent tot 202 miljoen ton CO_2-equivalenten per jaar.[33] De term 'equivalent' betekent dat emissies van andere broeikasgassen omgerekend worden naar hoeveelheden CO_2 met hetzelfde klimaateffect. De emissies in Nederland zijn de laatste jaren vrij stabiel en iets onder het niveau van 1995. In 2004 lag de uitstoot nog 3,7 procent boven het target van 202 miljoen ton per jaar. Het energieonderzoekscentrum ECN schat dat zonder maatregelen de equivalente CO2-productie niet 3,7 maar 10 procent hoger zou zijn geweest.

Overigens wordt de feitelijke reductie niet in Nederland behaald, maar in het buitenland onder de namen *Joint Development* en *Clean Development Mechanism*. Het is kennelijk makkelijker om buiten de grenzen de CO_2-uitstoot terug te brengen dan in Nederland zelf. Het ministerie van VROM stelt in haar evaluatienota klimaatbeleid dat in de periode 2008 tot 2012 de gemiddelde uitstoot in Nederland 222 miljoen ton mag bedragen en dat er 20 miljard ton reductie in het buitenland gerealiseerd moet zijn. Als het lukt heeft Nederland in 2012 slechts 5 procent meer uitstoot dan in 1990, maar door reductie van 10 procent (20 miljard ton) elders, voldoet ons land toch aan de 6 procent vermindering waaraan het zich gecommitteerd heeft. In vijftien jaar tijd is dan 6 procent CO_2-equivalent uitstoot verminderd, dat is 0,4 procent per jaar. In dat tempo duurt een verdere vermindering van 70 procent nog 300 jaar.

Hoe langer het duurt voordat we de emissie tot een kwart van het huidige niveau hebben teruggebracht, hoe hoger het stabilisatieniveau. Pearce spreekt over de *trillion tonne challenge*; de uitdaging om de totale hoeveelheid koolstof in de atmosfeer onder de 1000 miljard ton te houden (en de concentratie op 470 ppm). Snelle en drastische maatregelen leiden tot een laag en relatief veilig stabilisatieniveau. Hoe langer we wachten, des te hoger de uiteindelijke CO_2-concentratie zal worden en hoe groter de kans op extreme klimaatverandering. Denk aan afsmeltend landijs, zeespiegelstijging, verschuiving van neerslagpatronen met droogtes en overstromingen tot gevolg etcetera.

De orkaan Katrina die in 2005 de stad New Orleans verwoestte, wordt gezien als voorbode van wat een veranderend klimaat concreet kan betekenen. De wervelstorm van categorie 3 (windsnelheden van 205 kilometer per uur) bereikte New Orleans op 29 augustus 2005. Het zou de kostbaarste en een van de meest dodelijke stormen worden die de Verenigde Staten ooit geteisterd hebben. Beelden van de stad die voor

80 procent onder water stond, staan nog scherp op het netvlies. In totaal moesten 1,2 miljoen mensen hun huizen verlaten. Velen kwamen de stad niet meer uit doordat de uitvalswegen onbegaanbaar waren geworden. Gestrande inwoners zochten een onderkomen in het sportstadion *Superdome*, dat door de ontbrekende voorzieningen, geweld en de enorme drukte al snel tot een hel werd. Het zou weken, soms maanden duren voordat mensen uitsluitsel kregen over het lot van hun familieleden of vrienden. De wereld keek verbijsterd toe hoe zoveel ellende en ontreddering kon bestaan in het rijkste land ter wereld. Het aantal slachtoffers bedraagt minimaal 1833, waarbij er nog 700 mensen vermist zijn. De schade wordt geraamd op 84 miljard dollar, een recordbedrag.

Was Katrina nu het gevolg van klimaatverandering? Dat is voor individuele gebeurtenissen nooit te zeggen. Net zo min als de extreem hete zomer van 2003 (KNMI: 'heetste zomer in 500 jaar') met zekerheid valt terug te voeren op de klimaatverandering. Maar net als de hittegolf van 2003 met 35.000 slachtoffers in Europa, past Katrina in 2005 wel in het verwachtingspatroon.

Ruim een maand voor Katrina, op 4 augustus 2005, verscheen in het wetenschapsblad *Nature* een artikel van meteoroloog Kerry Emanuel van het *Massachusetts Institute of Technology*. Daarin voorspelde Emanuel dat wervelstormen heviger zouden worden als gevolg van het broeikaseffect. Uit meteorologische archieven had hij gevonden dat de kracht van tropische wervelstormen rond de Golf van Mexico in dertig jaar tijd was verdubbeld. Niet het aantal neemt toe, maar wel de windkracht en de tijdsduur en daarmee de intensiteit en de veroorzaakte schade.[34]

Het verwoestende vermogen, volgens Emanuel tweehonderd keer groter dan het totale elektriciteitsverbruik op aarde of iedere twintig minuten een kernbom van 10 megaton, is evenredig met de derde macht van de windsnelheid, die op zijn beurt afhangt van de temperatuur van het zeewater. Over de afgelopen dertig jaar is de temperatuur van het zeewater 0,5 graden gestegen. De windsnelheid is 50 procent toegenomen en de gemiddelde duur van een storm 60 procent. In augustus voorspelde MIT-meteoroloog Kerry Emanuel dat de verwoestende kracht van wervelstormen als gevolg van het broeikaseffect via de opwarming van het oceaanwater zou toenemen. Nog geen twee maanden later bereikte de meest verwoestende orkaan in de geschiedenis de Amerikaanse zuidkust.

Een ander voorproefje van de gevolgen van klimaatverandering is het langlopende conflict in Darfur, Soedan. De Britse minister van bui-

tenlandse zaken Margaret Beckett verklaarde dat veranderende weersystemen de achterliggende oorzaak zijn van het slepende conflict in Soedan waar boeren en veehouders strijden om de laatste restjes land waar nog regen valt.[35] 'Je hebt klimaatverandering, teruglopende neerslag en krimpende gebieden die geschikt zijn voor landbouw' zegt Francis Kornegay[36], senior-analist bij het centrum voor beleidsstudies in Johannesburg. 'Tel daar de bevolkingsgroei bij, en je hebt een explosieve situatie.' Noord-Afrika is extreem gevoelig voor kleine veranderingen in de hoeveelheid neerslag en ironisch genoeg produceert Afrika de kleinste hoeveelheid broeikasgassen die voor de klimaatverandering verantwoordelijk worden gehouden. 'Er zullen meer Darfurs komen,' waarschuwde Margaret Beckett. Een paar weken later stond een klein bericht in de krant van hoe klimaatverandering concreet uit kan pakken:

Afrikanen vluchten voor hoog water

Mogadishu – Grote delen van het oosten van Afrika kampen met overstromingen als gevolg van wekenlange zware regenval. In Somalië, Kenia en Ethiopië zijn honderdduizenden mensen op de vlucht voor het natuurgeweld, dat al vele tientallen slachtoffers heeft geëist.

Vooral in het toch al door oorlog verscheurde Somalië is de situatie ernstig. Zeker 300.000 mensen hebben huis en haard verlaten. Tot dusver zijn 52 mensen verdronken of door de krokodillen verslonden. Als de weersvoorspellingen uitkomen en de regen nog een paar weken aanhoudt, zijn een miljoen mensen in gevaar.

Buurland Kenia gaat uit van dertig doden en 80.000 vluchtelingen.

(Bron: Trouw, 23 nov 2006)

Rijke landen stoten de meeste broeikasgassen uit. Arme landen hebben het meest en het vroegst te lijden van klimaatverandering. Dit is geen GroenLinks-manifest, maar een citaat uit het rapport dat Nicholas Stern, voormalig hoofdeconoom bij de Wereldbank, eind oktober 2006 publiceerde over de kosten van de klimaatverandering.[37]

De *Stern Review* brengt de kosten van klimaatverandering zo goed mogelijk in beeld. In een compact overzicht (FIG.17) noemt Stern bij verschillende CO_2-concentraties de verwachte temperatuurstijging (met de bijbehorende onzekerheidsmarge) en daaronder vermeldt het rapport de te verwachten gevolgen. De huidige CO_2-concentratie bedraagt 380 ppm, maar met de andere broeikassen erbij opgeteld komt de concentratie op 430 ppm CO_2-equivalent. Stabilisatie op 450 ppm lijkt dus niet erg reëel. Stern zet in op een stabilisatie-niveau van 500 tot 550 ppm. Om dat te bereiken zou de CO_2-uitstoot tussen 10 en 20 jaar zijn maximum bereikt moeten hebben en daarna dalen met 1 tot 3 procent per jaar (dat is 2 tot 6 keer zo snel als onder het Kyoto-protocol) om rond 2050 met 25 procent gedaald te zijn. Dat zal een flinke kluif worden.

Tegelijkertijd zijn de verwachte veranderingen in het klimaat al tamelijk dramatisch. Veel mislukte oogsten in Afrika met hongersnoden tot gevolg, watertekort voor naar schatting 1 miljard mensen, afsmelten van berggletsjers, massaal uitsterven van diersoorten (één studie schat 20 tot 50 procent in de loop van de eeuw), krachtiger wervelstormen, meer bosbranden en afsmelting van het landijs op Groenland.

Klimaatverandering in Europa:

Gemiddelde temperatuurstijging wereldwijd anno 2007:
0,6 graden Celsius
Gemiddelde temperatuurstijging Europa anno 2007:
1,5 graden Celsius
Gemiddelde temperatuurstijging wereldwijd 2100:
2 tot 5 graden Celsius
Gemiddelde temperatuurstijging Europa 2100:
3,5 tot 6,5 graden Celsius

Voorspelde weersveranderingen Noord-Europa:

Warmere en minder koude dagen en nachten
10 tot 20 procent meer regen in de winter
10 tot 20 procent minder regen in de zomer

IPCC rapport Fourth Assessment Report, Werkgroep I

Wil het niet erger worden, dan moeten we volgens Stern 1 procent van het nationaal inkomen beschikbaar maken voor maatregelen: (1) vermindering van vraag naar emissierijke goederen en diensten (anders gezegd: minder vliegen), (2) verhogen van efficiëntie om geld en uitstoot te besparen, (3) ontbossing voorkomen en (4) overschakelen naar emissiearme (*'low-carbon'*) technologieën voor opwekken van elektriciteit, warmte en transport.

Als belangrijkste instrumenten om dat te bewerkstelligen beveelt Stern een systeem aan van CO_2-belasting. Het systeem van emissiehandel dat in de EU vanaf 1 januari 2005 in werking is, zou wereldwijd toegepast moeten worden. Landen krijgen onder zo'n systeem een bepaalde hoeveelheid emissierechten die ze met elkaar kunnen verhandelen. De prijs voor een ton CO_2 bedraagt nu tussen de 8 en 16 euro.[38] Een dergelijk systeem zou blijvend ingevoerd moeten worden, waardoor emissiearme technologieën aantrekkelijker worden. Daarnaast moeten overheden twee keer meer investeren in onderzoek naar CO_2-arme technologieën en die laten inzetten bij de elektriciteitsproductie. Bovendien moeten de maatregelen voor lange tijd vastgesteld worden, omdat bedrijven anders de investeringen niet aandurven. Een centrale bouw je voor veertig jaar. Tenslotte is Stern voorstander van verplichte energiestandaards voor gebouwen en apparaten.

Maar alles staat of valt met internationale samenwerking. Klimaatverandering is een globaal probleem. 'Alleen directe en sterke internationale samenwerking kan de ergste gevolgen van klimaatverandering ondervangen,' aldus Nicholas Stern.[39]

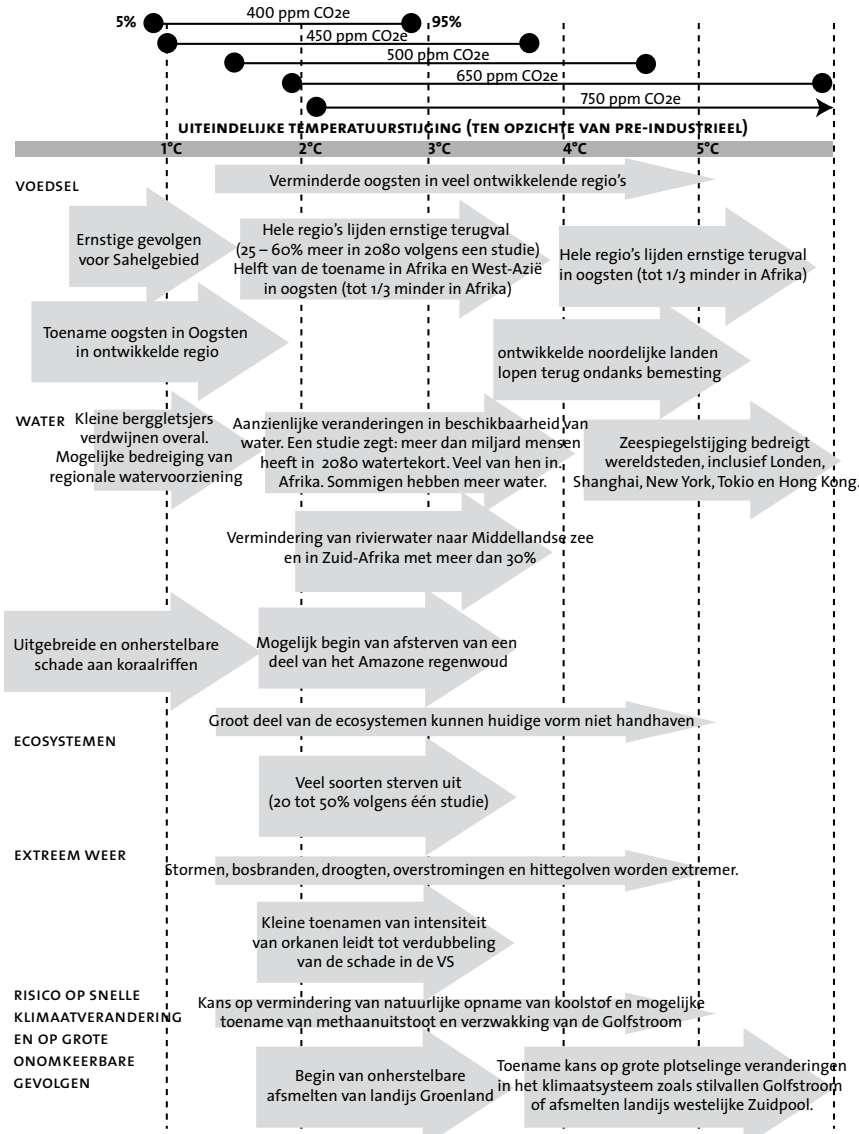

FIG.16 Stabilisatieniveaus en de waarschijnlijkheidsmarges voor temperatuurstijging. In het bovenste gedeelte van de FIGuur de door het IPCC voorspelde temperatuurstijging bij verschillende stabilisatieniveaus van atmosferische CO2. Daaronder de mogelijke gevolgen van de klimaatverandering. Het verband tussen temperatuurstijging en lokale klimaatveranderingen is erg onzeker. Dat geldt in het bijzonder voor veranderingen in de neerslagpatronen. – Bron: Stern Review, 2006

Op de splitsing

Het jaar 2006 kon wel eens te boek komen te staan als het jaar van het klimaat. Twee jaar eerder was er de klimaatfilm *The Day after Tomorrow* (2004), erg griezelig maar niet heel waarschijnlijk. Het jaar daarop raasde orkaan Katrina over New Orleans, waardoor het natuurgeweld opeens wel heel concreet werd. En in 2006 begon Al Gore zijn tournee met de klimaatdocumentaire *An Inconvenient Truth*.[40] Nederland beleefde in juli 2006 zijn eigen klimaatrampje, met een hittegolf die naar schatting duizend mensen het leven kostte. Dat bracht Nederland op een verrassende vierde plaats van de grootste natuurrampen op de lijst van de VN organisatie *International Strategies for Disaster Reduction*.[41]

Ook wereldleiders kunnen niet langer om het klimaatprobleem heen. Op de G8-top in Gleneagles in juli 2005 kwam het vraagstuk van energie en klimaat ter tafel. Behalve de staatshoofden van de G8-landen waren er ook leiders van ontwikkelingslanden aanwezig en hoofden van internationale organisaties. Men erkende dat afhankelijkheid van oliestaten en klimaatverandering tot een meer duurzame energievoorziening noopte. Het fossiele brandstofverbruik moet naar beneden en de uitstoot van broeikasgassen ook. Maar hoe? Het gezaghebbende Internationale Energie Agentschap IEA kreeg de opdracht om 'te adviseren over alternatieve energiescenario's en strategieën die gericht zijn op een schone, slimme en concurrerende energietoekomst.'[42]

Het Parijse agentschap IEA maakt ieder jaar een wereldomvattend overzicht van het energieverbruik met prognoses voor de toekomst. Maar in 2006 bracht het agentschap een dubbeldik rapport uit waarin niet één maar twee energiescenario's worden geschetst: het referentiescenario dat voorrekent wat er te verwachten valt wanneer de wereld op dezelfde voet doorgaat, en daarnaast het alternatieve scenario dat de consequenties berekent van de diverse groene beleidsvoornemens die op dat moment bekend waren. Het lijvige *World Energy Outlook* 2006 is de wegwijzer voor een wereld die voor de keuze staat: 'Onvoldoende geïnvesteerd, kwetsbaar en vuil of schoon, slim and competitief.'[43]

Het referentiescenario van het IEA gaat uit van het energiebeleid zoals dat in het midden van 2006 vastgesteld was. Voorgenomen veranderingen worden hier buiten beschouwing gehouden. Die komen in het alternatieve scenario aan bod.

De referentiewereld is een wereld van meer van hetzelfde: meer mensen, meer omzet en een op energiegebied langzame, marktgestuurde innovatie. De wereldbevolking groeit in het referentiescenario met ongeveer 1 procent per jaar van 6,4 miljard in 2004 tot 8,1 miljard in 2030. De snelheid van de groei zal over die periode waarschijnlijk geleidelijk afvlakken. De bevolkingsgroei is in ontwikkelingslanden en Azië het grootst, waardoor hun aandeel in de wereldbevolking toeneemt. Het bruto nationaal inkomen zal gemiddeld met 3,4 procent groeien, aanvankelijk is de groei nog 4 procent en tegen 2030 eerder 2,9 procent, verwacht het IEA. De economische groei zal het sterkst zijn in India, China en enkele andere Aziatische landen. Ook zal er een verschuiving plaatsvinden van zware energie-intensieve industrie naar een meer service- en informatiegerichte economie. De olieprijs gaat van 51 dollar in 2005 naar 60 dollar in 2007 en dan naar 47 dollar in 2012. In 2030 verwacht de IEA een olieprijs van 55 dollar per vat.[44] Een stuk hoger dan de prognoses van een jaar eerder, merkt de energieorganisatie op. Bovendien kunnen 'nieuwe geopolitieke spanningen of, erger, een grote ontregeling van de toevoer de prijzen opstuwen tot 100 dollar of meer.'[45] Tot slot voorziet het IEA dat opwekking en gebruik van energie geleidelijk steeds efficiënter wordt. Een langzaam proces, dat afhankelijk is van de beschikbare technologie en van de geldelijke winst die met een hoger rendement behaald kan worden.

Het energieverbruik in het referentiescenario stijgt met 1,6 procent per jaar tot ruim anderhalf keer het huidige gebruik (153 procent) in 2030.[46] Bijna driekwart van die stijging vindt plaats in ontwikkelende economieën. De helft van de energiestijging komt op conto van de elektriciteitscentrales. Fossiele brandstof blijft met 80 procent dominant, waarbij steenkool de grootste groei doormaakt.

Van brandstofschaarste is tot 2030 nog geen spoor. Maar wel zullen er aanzienlijke investeringen in de energiesector nodig zijn om aan de toename in vraag te kunnen voldoen. In de stroomsector bijvoorbeeld is 11.000 miljard dollar nodig aan nieuwe investeringen, in de olie-industrie 4.300 miljard en in de gassector 3.900 miljard. De helft van die astronomische investeringen zal plaats vinden in ontwikkelende economieën, omdat daar de energievraag het sterkst zal stijgen. Het IEA heeft

de schatting van benodigde investeringen in vergelijking met het vorige rapport al met 15 procent verhoogd, omdat de kosten van installaties in de olie- en gasindustrie door de toegenomen vraag fors gestegen zijn. De investeringen bestaan voor ongeveer de helft uit vervanging van bestaande installaties, de andere helft is nodig om de capaciteit met ruim 50 procent uit te breiden.

De consequenties van een dergelijk scenario voor de atmosfeer blijven niet uit. De uitstoot van CO_2 groeit in de periode tot 2030 met 55 procent tot ruim 40 miljard ton CO_2 per jaar. Driekwart van de toename vindt plaats in ontwikkelende economieën als China en India. Rond 2012 zullen die een hogere uitstoot hebben dan de OESO-landen.[47] De CO_2-uitstoot groeit sneller dan het energieverbruik omdat er veel steenkool en weinig aardgas wordt gebruikt.[48] De CO_2-emissie van China wordt in de periode tot 2030 ruim twee keer zo groot en al voor 2010 zal China de plaats van de Verenigde Staten hebben overgenomen als 's werelds grootste CO_2-producent. Ook andere Aziatische landen, waaronder India, dragen volgens het IEA fors bij.

Het gevolg is een ongekende stijging van de CO_2-uitstoot. Het is alsof de wereld een eindsprint inzet. Het IEA verwacht dat onder het referentiescenario de wereldwijde CO_2-emissie tegen 2030 met de helft toegenomen zal zijn. In 2050 zal de jaarlijkse uitstoot zelfs verdubbeld zijn ten opzichte van nu. Dat laat weinig heel van het Kyoto-protocol.[49] Als de wereld het referentiescenario volgt, dan zullen de westerse landen van het OESO gemiddeld 29 procent boven hun doelstelling terecht komen.[50]

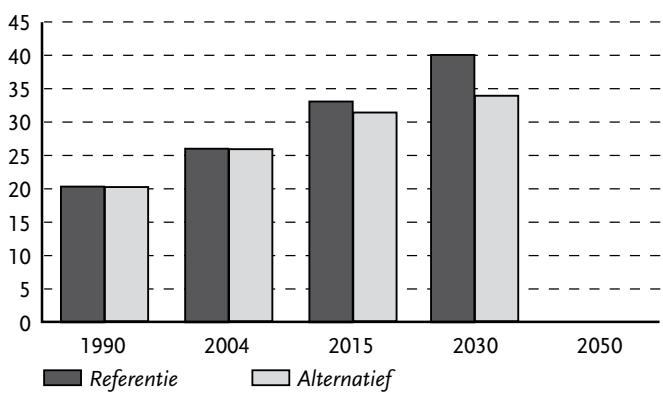

FIG.17 Uitstoot van CO_2 in miljarden tonnen per jaar onder referentie- en alternatieve scenario.

Het zogenaamde 'alternatieve scenario' voor de wereldenergievoorziening is gebaseerd op nieuw klimaat- en energiebeleid zoals dat in 2006 overwogen werd. De lijst met goede voornemens is in het IEA rapport twee bladzijden lang. Opvallend is dat overal ter wereld het gebruik van biobrandstoffen bevorderd wordt. Met name van ethanol. Europa wil bijvoorbeeld in 2010 5,75 procent van de benzine vervangen door biobrandstof en dat moet tegen 2020 10 procent zijn. In Amerika, China, India en Japan lopen vergelijkbare programma's.

Efficiënter gebruik van energie op de weg, in huis en in de industrie moet de honger naar energie beteugelen. Verder zetten Europa en VS in op meer gebruik van biomassa in elektriciteitsopwekking. Ook China en India hebben doelstellingen geformuleerd die het gebruik van groene stroom moeten bevorderen (bijvoorbeeld door windturbines en waterkrachtcentrales). Daarnaast willen China en India de atoomenergie fors uitbreiden tot 40 gigawatt ieder.

De lijst van CO_2-beperkende maatregelen is lang, maar de vraag is wat het oplevert. Dat is de opdracht die het IEA meekreeg: reken nu eens uit wat het effect is op de CO_2-emissie en wat het gaat kosten.

Het energieagentschap schat dat het nieuwe energiebeleid de wereldenergievraag in 2030 met ongeveer 10 procent zal verminderen ten opzichte van het referentiescenario. Met andere woorden het energieverbruik zal vanaf 2004 niet met 52 procent stijgen, maar met 37 procent.[51]

Het alternatieve scenario mag een drastische omslag in het denken weerspiegelen, het gevolg voor het energieverbruik en de CO_2-emissies is niet meer dan een koerswijziging.

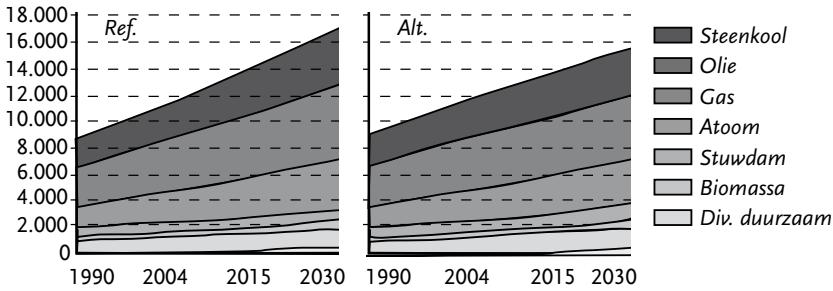

FIG.18 Waar halen we de energie vandaan? Het mondiaal energieverbruik in referentie- en alternatief IEA-scenario in Mtoe-eenheden – Bron: IEA

Die koerswijziging is ook terug te vinden in de samenstelling van energiebronnen, de zogenaamde energiemix. Fossiele brandstoffen vormen in 2030 met 77 procent nog steeds de hoofdmoot, maar het aandeel steenkool is meer dan 20 procent lager dan in het referentiescenario. De groei in steenkool bedraagt in de periode 2004 tot 2030 slechts 0,9 procent per jaar, half zo snel als onder het referentiescenario. Na 2020 verwacht het IEA dat de steenkoolproductie afvlakt.[52] Het olieverbruik groeit eveneens met 0,9 procent per jaar.[53] Daardoor ligt in 2030 de olieconsumptie 11 procent onder het referentiescenario. Ook de gasconsumptie stijgt, maar met 1,5 procent per jaar in plaats van 2 procent. De geringere stijging van steenkool en gas is voornamelijk het gevolg van de verminderde vraag naar elektriciteit onder het alternatieve scenario. Een deel van de energievraag wordt ook ingevuld door andere bronnen zoals kernenergie, biomassa en andere duurzame bronnen zoals zonne- en windenergie.

De jaarlijkse CO_2-uitstoot in 2030 zal onder het alternatieve scenario 6,3 miljard ton (16 procent) minder bedragen dan onder het referentiescenario. Europa en Japan zullen in 2030 minder CO_2 produceren dan in 2004, maar dat wordt ruim gecompenseerd door de andere landen.[54] Het grootste deel (80 procent) van de CO_2-beperking is het gevolg van efficiëntere energieproductie en zuiniger energiegebruik.

Het alternatieve scenario pakt goedkoper uit, stelt het energieagentschap, doordat de besparingen de investeringen ver overtreffen. Investering van 800 miljard dollar aan zuiniger auto's in OESO-landen en Azië levert over de periode tot 2030 een besparing op aan olie-import van 1.900 miljard, ruim twee keer meer dus.

De rekening voor het alternatieve scenario komt voor het grootste deel bij de consument terecht; energiebedrijven hoeven namelijk minder te investeren dan in het referentiescenario. Investering in zuiniger elektrische apparaten kost de consument 950 miljard dollar, maar daar staat voor het energiebedrijf een uitgespaarde investering van 1.100 miljard tegenover vanwege centrales en netwerken die achterwege kunnen blijven. Maar uiteindelijk is ook de consument goedkoper uit, want tegenover de 2.400 miljard dollar aan investeringen in apparaten met een hoger rendement, beter geïsoleerde woningen en zuiniger auto's, staat een besparing op de energierekening van 8.100 miljard dollar, aldus het energieagentschap.

Maar het kan nog beter. Het agentschap heeft nog een verdergaand scenario ontwikkeld dat ze BAPS noemen (*Beyond Alternative Policies Scenario*). Hierin laat het IEA de bestaande beleidsvoornemens achter zich en berekent wat er nodig zou zijn om de uitstoot in 2030 terug te brengen tot onder het niveau van 2004. Daarvoor is snellere en bredere introductie nodig van de meest geavanceerde energietechnieken. In het BAPS jaagt een agressief beleid de technologische innovatie aan, ook al is die economisch nog niet lonend. Het doel is een reductie van nòg eens 8 miljard ton CO_2 in de jaarlijkse uitstoot in 2030. Daarvoor is een reeks van maatregelen nodig, om te beginnen een nog verder gaande energiebesparing (de helft meer) dan in het alternatieve scenario. Twee derde daarvan in huizen, een derde in de industrie. Dat zou 2 miljard ton CO_2 kunnen uitsparen. Nog 6 miljard ton te gaan. Efficiënter gebruik van brandstof in de industrie, meer lichte en hybride voertuigen, elektriciteitscentrales met een hoger rendement, meer kerncentrales in plaats van kolencentrales, meer gebruik van duurzame bronnen in de stroomproductie en tenslotte de afvang en opslag van CO_2 bij elektriciteitscentrales zou ieder 1 miljard ton CO_2 per jaar kunnen uitsparen. Dat zou de uitstoot van CO_2 in 2030 terugbrengen tot 26,1 miljard ton per jaar. Terug op het niveau van 2004.

Voor de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer in 2030 maken de diverse scenario's nauwelijks verschil. Het klimaat is zo'n traag systeem dat de echte verschillen zich pas in het tweede helft van de eeuw aftekenen. Dat zie je ook terug in de temperatuurvoorspellingen voor de komende eeuw van het IPCC.

In februari 2007 presenteerde het *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) haar vierde rapport over de klimaatverandering. Daarin stelde het IPCC vast dat de opwarming van de aarde nu wel vast stond, met elf van de twaalf voorgaande jaren die als warmste te boek stonden sinds de metingen begonnen zijn. Bovendien durfde het panel de conclusie aan dat de opwarming 'very likely' (met meer dan 90 procent zekerheid) veroorzaakt was door de mens.

Gevolgen, in termen van temperatuurveranderingen, blijven moeilijk te voorspellen. Dat komt omdat niet bekend is hoe de uitstoot van CO_2 zich in de komende eeuw gaat ontwikkelen (verschillende scenario's zijn denkbaar), en bovendien omdat niet in detail bekend is hoe het klimaatsysteem op een toename in CO_2 reageert. Goed, er wordt meer warmte vastgehouden, maar wat is de invloed van de extra luchtvervui-

ling, van groener wordende toendra en van versneld afsmeltend ijs in de poolgebieden?

Hoeveel co2 in 2030?

Referentie, Alternatief of BAPS. Maar waar het uiteindelijk om gaat is natuurlijk: hoeveel CO_2 komt er in de atmosfeer? Een goed antwoord daarop heb ik in de boeken niet kunnen vinden. Maar een bierviltjesberekening brengt ons ook al een eind.
In het referentiescenario neemt de CO_2-emissie toe van 26,1 miljard ton per jaar in 2005 tot 40,4 miljard ton in 2030. In de tijd tot 2030 is er dus ieder jaar gemiddeld (26,1 + 40,4) / 2 = 33,3 miljard ton in de atmosfeer bijgekomen. Over 25 jaar tijd is dat 831 miljard ton. Veertig procent daarvan wordt opgenomen in de atmosfeer, aannemende dat de natuur nog niet verzadigd raakt, zodat er 60 procent of 500 gigaton in de lucht blijft. De hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer in 2005 bedroeg 2.800 gigaton[55]; in 2030 wordt dat dus 3.300 gigaton. Omgerekend komt dat overeen met een CO_2 concentratie van 3.300 / 2.800 * 380 = 447 ppm.[56]

Op dezelfde manier is te berekenen dat het alternatieve scenario in 2030 een CO_2-concentratie oplevert van 441 ppm en het BAPS scenario 437 ppm. Voor de toekomst van het leven op aarde is de keuze van het juiste scenario van groot belang, maar over enkele decennia is er nog weinig effect van te verwachten.

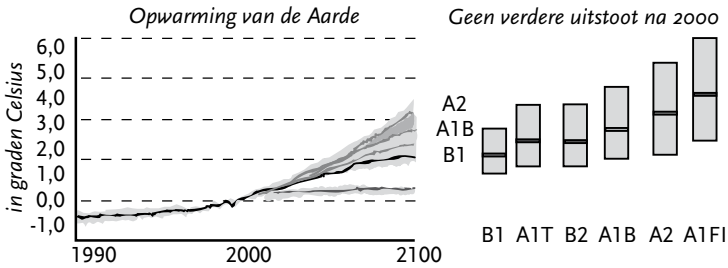

FIG.19 Voorspelde temperatuurstijgingen bij verschillende scenario's. Links: de stijging in de tijd, rechts de mogelijke uitkomst in 2100 met bandbreedte van onzekerheid. A1FI is een sterke economische groei gebaseerd op fossiele brandstof, A1B een sterke economische groei, maar een gebalanceerde energiemix. – Bron: IPCC rapport 2007'

Het IPCC heeft verschillende klimaatscenario's doorgerekend, waaronder het A1FI scenario van een snelle economische groei met fossiel brandstofgebruik en een wereldbevolking die rond 2050 zijn maximum bereikt. Dat scenario komt aan het einde van de eeuw uit op temperatuurstijging van tussen 2 en 6 graden. Het A1B scenario is minder afhankelijk van fossiele brandstoffen, maar gebruikt een balans van verschillende energiebronnen. In dat geval komt de wereld aan het eind van de eenentwintigste eeuw op een temperatuurstijging tussen 1,6 en 4,2 graden terecht. Maar rond 2030 zijn de verschillen nog minimaal: rond 0,6 graden warmer dan nu (en 1,2 graden meer dan in 1900). Voor alle duidelijkheid: de IPCC scenario's komen niet overeen met de scenario's van het IEA (referentie, alternatief en *BAPS*). De uitkomsten zijn dan ook niet direct vergelijkbaar.

Werkgroep 3 van het IPCC publiceerde de onderstaande samenhang tussen CO_2 concentratie en temperatuurstijging.[57] CO_2-equivalent betekent dat alle broeikasgassen bij elkaar genomen zijn en omgerekend naar een gelijkwaardige concentratie CO_2. Temperatuurstijging is ten opzichte van pre-industrieel.

Co2-equivalent *(ppm)*	**Temperatuurstijging** *(°C)*
445 - 535	2,0 - 2,8
535 - 590	2,8 - 3,2
590 - 710	3,2 - 4,0

TAB.01 Temperatuurstijging bij verschillende broeikasgasconcentraties. – Bron: IPCC IV, werkgroep 3.

Op basis van de verschillende rapporten kunnen we nu wel een voorzichtige conclusie trekken. De CO_2-concentratie anno 2030 zal ongeveer 440 ppm bedragen, welke weg we ook inslaan. Een dergelijke CO_2-concentratie betekent volgens het rapport werkgroep 3 van het IPCC: 2 tot 2,5 graden temperatuurstijging. Nicholas Stern vertaalt dat als: grote droogte in de Sahel, berggletsjers verdwijnen met watertekort voor de bergbewoners als gevolg, koraalriffen raken in verval en het landijs op Groenland begint weg te smelten.[58] Voor de komende twee decennia kunnen we hoe dan ook 0,4 graden temperatuurstijging tegemoet

zien.[59] Daaraan valt niet meer te ontkomen. Maar als er nu niks gebeurt om de CO_2-uitstoot te beteugelen, dan staat de wereld er aan het einde van de eeuw nog een stuk beroerder voor.

Het IPCC formuleerde het in het laatste rapport alsvolgt: tegen 2050 moet de wereldwijde emissie met 50 procent gereduceerd zijn (voor Europa betekent dat 80 procent). We moet in de komende 30 jaar de stijging van de uitstoot van broeikasgassen ombuigen naar een forse daling.

Dat is de taak van de energierevolutie. Een dergelijke omwenteling heeft verregaande consequenties voor ons dagelijks leven. De huizen zullen veranderen, de auto's, de steden en dorpen en onze manier van leven.

In antwoord op de vraag van de G8-wereldleiders of verduurzaming van de energievoorziening mogelijk is, schrijft het internationaal energieagentschap: 'De bestaande beleidsvoornemens zouden een begin maken om de wereld op een aanzienlijk andere koers te sturen dan het referentiescenario – een koers die, ver na 2030, naar een waarlijk duurzame energietoekomst zou kunnen leiden, waarin de energievoorraden zeker gesteld zijn en waarin de klimaatverandering tot stand is gebracht. Maar die beleidsverandering moeten wel onmiddellijk geïmplementeerd worden.'

De wereldbevolking staat nu dus op een splitsing en moet kiezen: doorgaan en willens en wetens het klimaat ontregelen, met toenemende natuurrampen tot gevolg. Of ernst maken met de verduurzaming om de schade te beperken. In het volgende deel ga ik op zoek naar praktische mogelijkheden om CO_2-uitstoot te beperken.

Een kwestie van fatsoen

In december 2006 verscheen de wereldberoemde natuurfilmer Sir David Attenborough voor de Britse kamercommissie voor het milieu. Hij vertelde dat hij ervan overtuigd was geraakt dat de huidige klimaatverandering het gevolg is van menselijk handelen. Er was naar zijn overtuiging geen twijfel over mogelijk dat de klimaatverandering erger gaat worden. 'Het enige dat we kunnen doen is zorgen dat het een beetje minder erg wordt.'

‘We moeten gaan beseffen dat energie verspillen slecht is, net als we het in de oorlog zonde vonden om eten te verspillen. Ik ben in de oorlog opgegroeid en we wisten: eten weggooien doe je gewoon niet. Diezelfde mentaliteit moeten we ontwikkelen tegenover energie, want alles wat we hier aan broeikasgassen produceren gaat de lucht in en blijft er honderd jaar hangen. Daarom doet het er niet toe of het een beetje is of veel, het gaat om de houding.’

FIG.20 Sir David in koolstofrrijke omgeving. - Foto: Blood Pressure Association

‘Ik heb wel hoop dat er een verandering ontstaat in de moraal.
Dat zuinig omgaan met energie niets te maken heeft met gierigheid, maar dat het een kwestie is van fatsoen, omdat energieverspilling de wereld van je kleinkinderen in gevaar brengt. Je ziet de mentaliteit al veranderen. Mensen kijken naar sportjeeps in het centrum van Londen en ze trekken hun lip al op.’

Bron: BBC-news, 13 dec 2006

DEEL II

Het palet

Een energiebron om fossiele brandstof en 'smerige' kernenergie te vervangen, is wenselijk, maar een goedkope bron van energie kan een ramp zijn. Als goedkope energie realiteit wordt, dan moet de overheid misschien maar belasting gaan heffen om de prijzen dicht bij het huidige niveau te houden. Het ontvangen geld kan dan gebruikt worden om los te komen van smerige energiebronnen en om met een grootschalige campagne de bende op te ruimen die we al gemaakt hebben.'

De Engelse lezer David Gibson Broadstone reageert in New Scientist (29 april 1982) op het gerucht van koude kernfusie, een eindeloze en goedkope energiebron.

De zon als bron

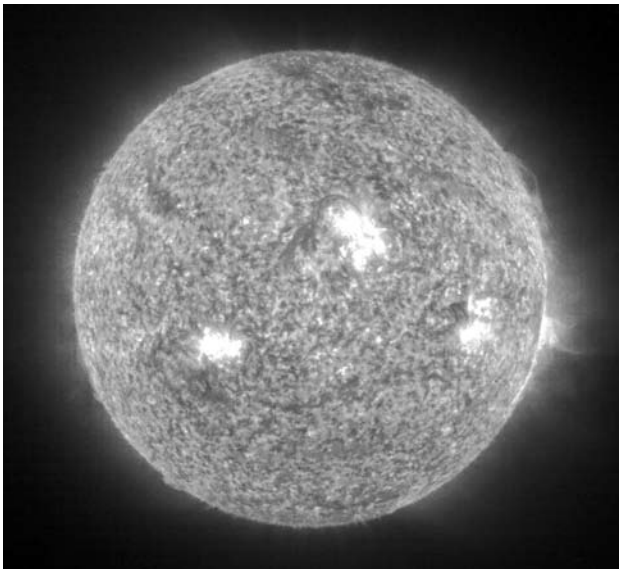

FIG.21 De hoeveelheid zonnestraling die de aarde bereikt is meer dan 10.000 keer groter dan het wereldenergieverbruik.

Energie zat

De hoeveelheid zonne-energie die op aarde valt is vele duizenden malen groter dan het menselijk energieverbruik. Zo'n twaalfduizend maal groter zelfs.[60] Het grootste deel van de zonnestraling wordt als warmte teruggekaatst de ruimte in. Een klein deel (0,1 procent) wordt opgenomen door de atmosfeer, waardoor temperatuurverschillen ontstaan, luchtdrukverschillen en wind. Planten nemen ook energie op, voor fotosynthese (0,4 procent). Water verdampt, condenseert in wolken en komt elders weer neer (0,003 procent). En toch, als je al die fracties bij elkaar optelt, kom je op een vermogen dat 870 keer groter is dan de mensheid verbruikt. Voor het totale potentieel aan duurzame energie zou je daar energiewinning uit aardwarmte en getijden nog bij op moeten tellen.[61]

Dit is natuurlijk nattevingerwerk, maar diepgaandere analyses komen tot dezelfde conclusie: de beschikbare duurzame energie is vele honderden malen groter dan de totale menselijke behoefte.

Maar als je kijkt waar in de praktijk de energie vandaan komt, dan is het aandeel duurzame energie verwaarloosbaar klein en de afhankelijkheid van fossiele brandstof enorm.

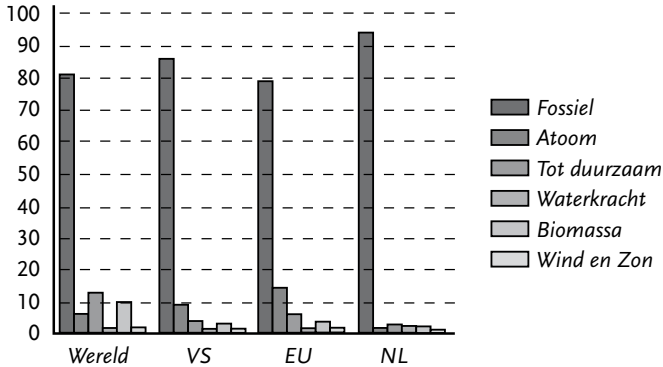

FIG.22 Relatieve herkomst (%) van de energie in 2004.[62]
Gegevens van IEA en Europese Commissie.

Het aandeel duurzame energie van 13 procent in de energieopwekking komt voornamelijk op het conto van ontwikkelingslanden, waar men geen andere brandstof dan hout of mest heeft. Je kunt het lezen als koken op houtvuurtjes. In de geïndustrialiseerde wereld bedraagt het gebruik van biomassa als brandstof niet meer dan een paar procent.

Voor elektriciteitsopwekking is het aandeel duurzaam wel iets groter:

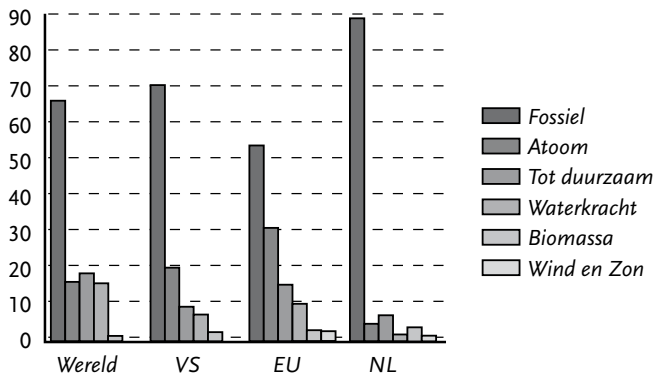

FIG.23 Relatieve herkomst (%) van de elektriciteit in 2004. [63]
Gegevens van IEA en Europese Commissie.

Momenteel wordt 18 procent van de elektriciteit in de wereld CO_2-vrij opgewekt. Dat betekent in de praktijk voornamelijk (16 procent) met waterkrachtcentrales. In Europa levert biomassa na waterkracht met 3 procent het grootste aandeel in de elektriciteit, gevolgd door 2 procent windenergie. Andere soorten van energie zoals aardwarmte of zonneenergie leveren een verwaarloosbare bijdrage.

Nederland is buitengewoon afhankelijk van fossiele brandstof, dankzij het aardgas. Gas levert in Nederland ruim een derde (36,7 procent) van de totale energie en bijna tweederde (63,8 procent) van de elektriciteit. Aardgas is een godsgeschenk aan de Lage Landen, maar geen duurzame oplossing.

Hoeveel duurzame energie is er maximaal te winnen? Ook daarover bestaan cijfers:

	Aandeel in wereld stroomproductie in 2003 [1]	*Potentiële bijdrage in totale energie (basis 2003)* [2]	*Economisch potentieel in stroomproductie EU* [3]
Waterkracht	16	11	18
Biomassa en afval	1	60	12
Wind	0,4	148	30
Aardwarmte	0,3	1100	7
Golf en getij	0,0	26	0
Zonnestroom	0,0002	360	33
Totaal (%)	18	1705	100

1. Cijfers uit 'Energy and the Challange of Sustainability', World Energy Assessment (New York 2000) 168.

2. Idem, totale energie 2003 bedraagt 130.000 TWh, daarvan is stroom met 16.700 Twh ongeveer 13%.

3. Cijfers uit Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power, summary, 5.

TAB.02 Mogelijke relatieve bijdragen (%) van duurzame bronnen

Het potentieel aan duurzame energie zou dus maar liefst 17 keer groter zijn dan het huidige wereldenergiegebruik. Het gaat hier om de theoretische mogelijkheid, die voorbijgaat aan economische haalbaarheid. Maar hoe is energie te winnen uit zon, wind, stroming, getijden, golven, aardwarmte, gewassen of zelfs poep? Is het goed op te slaan en te transporteren? En hoe is het te gebruiken?

Met die vragen zijn tal van mensen bezig. Specialisten op hun terrein en vaak belangstellend naar andere duurzame energievormen. Het zijn opvallend vaak vroege vijftigers, die in hun puberteit hoorden van het rapport van de Club van Rome (1972) en een jaar later kennis maakten met de oliecrisis. 'Dat heeft diepe indruk op me gemaakt,' vertelde hoofdonderzoeker Wolter Prins uit Enschede me. 'Het heeft me eigenlijk nooit meer losgelaten.' Zo raakte een generatie onderzoekers doordrongen van de noodzaak tot een andere, meer duurzame energievoorziening. Ik zocht een aantal van hen op omdat ik wilde weten hoe diverse vormen van groene energie werken en wat het potentieel ervan is. Aangenomen dat de energievoorziening van de toekomst een lappendeken van verschillende bronnen gaat worden, waaruit bestaat die dan?

Waterstof

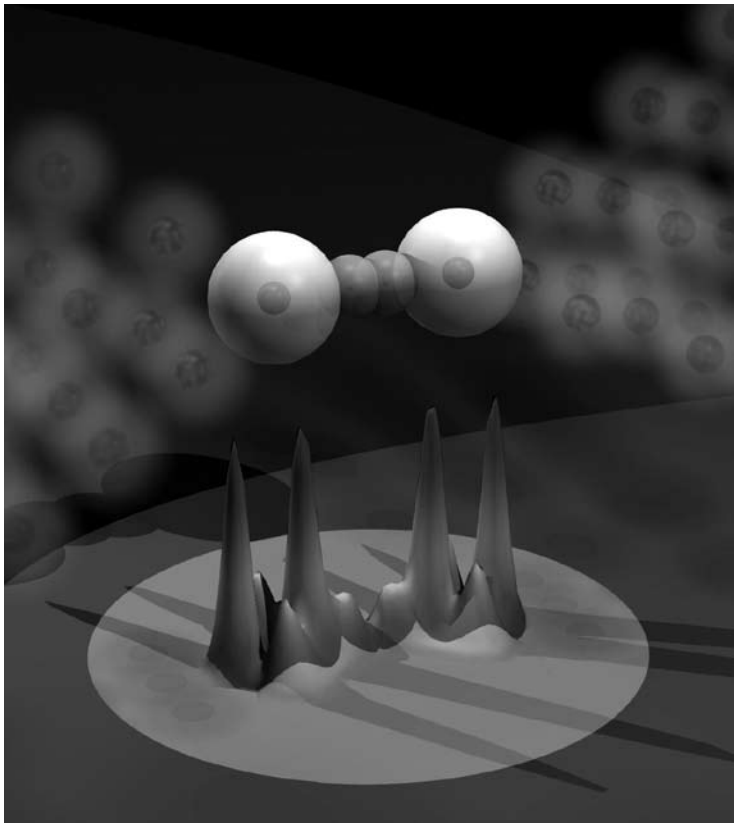

FIG.24 De elektrische geleiding van 1 waterstofmolecuul, in beeld gebracht door Dr. R.H.M. Smit, Kamerlingh Onnes Laboratorium, Universiteit Leiden.

'Water zal de steenkool van de toekomst zijn.'

Jules Verne, 1874

Waterstof op wielen

Toen ik Ronald Mallant voor het eerst bezocht op het Energieonderzoeks Centrum Nederland (ECN) in de Pettense duinen was dat voor een televisieprogramma over de brandstofcel.[64] Dat was in 1996 en men begon te denken over waterstof als universele en ultraschone brandstof.

In het laboratorium had Mallant toen een transparante opstelling gemaakt van perspex. Een slangetje met een kraantje voerde waterstofgas aan naar een donker blokje ter grootte van een luciferdoosje: de brandstofcel. Twee stroomdraadjes verbonden de brandstofcel met de elektromotor van een modelauto die op een zuiltje was vastgelijmd. Voor de demonstratie draaide Mallant de gaskraan open en enkele seconden later begonnen de wielen van het autootje te draaien. Krachteloos en in de lucht, maar het principe werkte: waterstofgas is met zuurstof uit de lucht om te zetten in elektriciteit (zie kader 'Hoe werkt een brandstofcel' aan het einde van dit hoofdstuk).

De techniek is in principe veelbelovend omdat een gewone automotor een rendement van slechts 15 procent haalt. Daar is veel winst te behalen. De rest van de energie uit de brandstof wordt omgezet in warmte. Je zou een auto kunnen zien als een kachel op wielen. Een brandstofcel daarentegen kan 80 procent van de energie uit waterstof omzetten in elektriciteit.

Nu zijn dat indrukwekkende, maar wel enigszins misleidende getallen. De waterstof moet namelijk eerst gemaakt worden. Als dat gebeurt door elektrische ontleding van water (H_2O) in waterstof (H_2) en zuurstof (O_2), dan wordt maximaal 40 procent van de elektriciteit in waterstof omgezet. Van elektriciteit via waterstof naar elektriciteit blijft er dus hoogstens 32 procent over (80 procent van 40 procent) en in de praktijk nog een stuk minder door de problemen met het onder druk brengen en het opslaan van het uiterst ijle waterstofgas. Dat was allemaal van later zorg. Het ging er nu om of het mogelijk zou zijn een auto op waterstofgas te laten rijden.

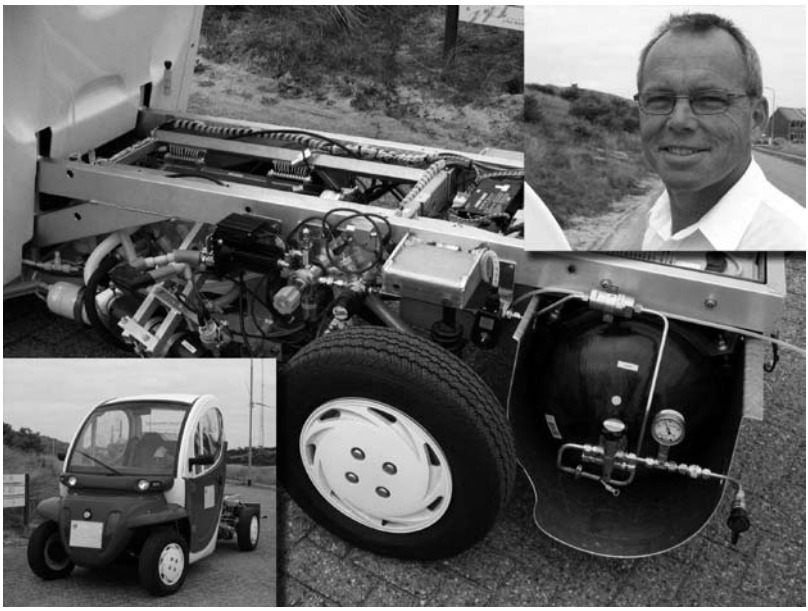

FIG.25 Ronald Mallant en het brandstofkarretje. – Foto's: JW

Superbatterij

Waterstof is een schone maar lastig hanteerbare manier om elektrische energie op te slaan. Een andere methode zijn de vertrouwde loodaccu's, maar die hebben veel tijd nodig om op te laden. Een nieuw ontwikkelde superbatterij verenigt de voordelen van beiden: een hoog rendement (70 tot 75 procent), onbegrensde capaciteit en eenvoudig bij te tanken.

Een prototype van de superbatterij of *flow battery* staat in een bakstenen loods op *King Island* in de zeestraat tussen Australië en Tasmanië. De *flow battery* neemt de hele loods in beslag: twee rijen met iedere vier grote ronde zwarte tanks met aan het uiteinde drie aluminium kubussen verbonden met pijpen en dikke stroomkabels.

De loods staat aan de rand van een windpark met een opgesteld vermogen van 2,5 megawatt. Omdat de wind nu eenmaal variabel is, zocht men naar een manier om pieken in de elektriciteit op te slaan om die bij afzwakkende wind in te kunnen zetten. Het dieselaggregaat hoeft dan

minder vaak bij te springen. Het experiment is voorspoedig verlopen: de superbatterij heeft het aandeel windenergie in de lokale stroomvoorziening verhoogd van 12 naar 40 procent, waardoor de benodigde hoeveelheid diesel gehalveerd is en jaarlijks 2.000 ton CO_2 wordt uitgespaard.

De *flow battery* slaat, net als een loodaccu, elektrische energie op in een omkeerbare chemische reactie. Maar anders dan de loodaccu is de superbatterij geen gesloten systeem; chemicaliën stromen door een cel en worden in gescheiden tanks opgeslagen. Die tanks zijn willekeurig groot te maken, waardoor de capaciteit feitelijk onbegrensd is. Het piekvermogen wordt begrensd door de grootte van de cel.

Het principe van de *flow battery* is al in 1980 bedacht door chemisch ingenieur Maria Skyllas-Kazacos van de Universiteit van New South Wales in Sydney. Het principe berust op de uitwisseling van elektronen tussen twee verschillende vloeistoffen die in de cel door een membraan worden gescheiden. Het probleem daarmee was dat na verloop van tijd de twee vloeistoffen begonnen te mengen, waardoor de werking achteruit ging.

Skyllas-Kazacos vond de oplossing door aan beide kanten dezelfde vloeistof te gebruiken (vanadiumsulfaat) maar met verschillende ladingen. Vanadiumionen in oplossing kunnen een positieve lading ter grootte van 2, 3, 4 of 5 elementaire ladingen hebben. Bij het oplossen van vanadium in zwavelzuur ontstaan ionen met lading 3 en 4. Wanneer een elektrische stroom door de oplossing gestuurd wordt, ontstaat 2-waardig vanadium ($V_{(II)}$) aan de negatieve elektrode en 5-waardig ($V_{(V)}$) vanadium aan de positieve elektrode. Kathode en anode zijn door een membraan van elkaar gescheiden. Zo laadt de batterij op.

Bij het ontladen pompt men de $V_{(II)}$-oplossing en de $V_{(V)}$-oplossing aan weerszijden van het membraan door de cel. Elektronen lopen dan spontaan buitenom door stroomkabels van de $V_{(II)}$- naar de $V_{(V)}$-oplossing. Zo komt driekwart van de opgeslagen elektriciteit weer vrij.

Het grote voordeel van de *flow battery*, ook wel de *Vanadium Redox Battery*, is de schaalbaarheid. Dat maakt de superbatterij inzetbaar voor veel verschillende toepassingen. Vanaf een 10 kilowattuur uitvoering voor een elektrisch karretje tot honderden megawattuur als opslagfaciliteit bij een centrale. Een tussenformaat van 12 megawattuur is in 2006 besteld voor het Ierse Sorne Hill windpark om de leveringszekerheid van het park te verbeteren. De firma VRB Power Systems uit Vancouver levert de batterij en experimenteert tevens met een elektrisch golfkarretje. Dat wordt nu

gewoon opgeladen aan het stopcontact. Maar in de toekomst is het denkbaar dat een elektrische auto vers opgeladen vanadiumoplossing tankt aan de pomp en de verbruikte oplossing afgeeft om te recyclen. Dat zou een alternatief voor de waterstofauto kunnen worden.

Bron: 'A bank for the wind', *New Scientist*, 13 jan 2007

Tien jaar later, in de zomer van 2006, brengt ECN een persbericht uit over een prototype waterstofauto die over het ECN-terrein in de duinen rijdt. Ik bel Ronald weer op, zoals ik wel vaker doe als ik iets over brandstofcellen wil weten, om een proefrit aan te vragen. 'Geen probleem, kom maar langs' zei hij.

Ronald is weinig veranderd: een getaande kop van de buitenlucht, kort geknipt grijzend haar en vriendelijke lachrimpels rond de ogen. We lopen naar een grote blauwe deur in één van de hallen op het ECN terrein. Daar in de hal staat het autootje dat ik herken van de foto bij het persbericht.

Het karretje doet denken aan een Smart met oplegger: een kleine, ronde, rood met witte cabine, met daarachter een soort vlakke metalen laadvloer die goeddeels open is en waarin allerlei techniek is ondergebracht. Pijpen, draden, ventielen, panelen met elektronica. Helemaal achterin is een dikke zwarte gasfles gemonteerd. Qua grootte ongeveer gelijk aan de beige-bruine gasflessen in vakantiewoningen en caravans, maar een stuk geavanceerder, want waterstof is zo ijl dat het onder hoge druk moet worden opgeslagen om voldoende brandstof op te kunnen slaan. Daarna volgen een aantal pijpjes en ventielen om de druk van het stapsgewijs terug te brengen. Vlak achter de cabine is een 'stack' brandstofcellen aangebracht, een compacte stapel zo groot als een schoenendoos. Genoeg voor een elektrisch vermogen van 5 kilowatt. Dikke kabels voeren de elektriciteit naar een stel accu's onder de cabine.

De dunne, kunststofdeur sluit met een luidruchtige klak. Niet erg solide, dit karretje. Het ziet er kek uit, maar je merkt dat het karretje niet bedoeld is voor de openbare weg. ECN heeft een bestaand elektrisch autootje genomen dat in gebruik is op bedrijfs- en golfterreinen en dat is aangepast aan rijden op waterstof. 'Je hebt geen versnellingen,' legt Ronald uit, 'en de rem is niet bekrachtigd. Er is een kleine schakelaar aan het stuur voor voor- en achteruit en de richtingaanwijzer moet je

zelf weer terugzetten. Net als vroeger in de eend,' voegt hij er aan toe. Ik ben inmiddels oud genoeg om me dat te herinneren.

Ik kijk in de spiegel om geen brokken te maken en druk het pedaal in. Over een gaspedaal kun je niet spreken, want alles is hier elektrisch. Het karretje springt vooruit en trekt flink door. Ik ben verbaasd, dit is een stuk feller dan ik gedacht had. Het voordeel van de elektromotor, licht Ronald toe. Ook bij laag toerental een groot koppel op de wielen. De display geeft aan: '0 kW, alles OK'. Hoezo 0 kilowatt, we rijden toch? De truc is dat de accu's de elektromotoren voeden en pas als de accu's lading nodig hebben, dan komt de brandstofcel in actie en die verzorgt de laadstroom naar de accu. Daarmee is de lastige hobbel van piekbelasting omzeild en kan de brandstofcel rustig zijn stroom leveren. Even later laat het display inderdaad zien dat er vermogen naar de accu gestuurd wordt.

Het karretje hobbelt over een klinkerweg op het ECN-terrein. De maximale snelheid bedraagt slechts 20 kilometer per uur, maar dan schudt alles zodanig dat je ook niet veel harder wilt. Nog wel even een hellingproef op een duinhelling. Remmen tot stilstand. Vol op het pedaal, en daar gaat-ie weer in sprint tot de twintig kilometer.

Van dinkytoy tot golfautootje in tien jaar tijd. Dat roept de vraag op wat we hier over nog eens tien jaar kunnen verwachten. In ieder geval geen personenwagen, denkt Mallant. Dan moet je een sprong maken van 5 naar 50 kilowatt of 100. Dat is geen werk voor ECN, maar voor de auto-industrie, waarmee overigens wel samengewerkt wordt.

De industrie heeft de ontwikkeling van brandstofcelauto's inderdaad opgepakt. Daimler-Chrysler was de eerste met de NECAR-1 in 1994: een busje met 800 kilogram apparatuur aan boord. Een soort rijdend laboratorium dat alleen plaats bood aan een chauffeur en bijrijder. Vijf jaar later was er al de NECAR-4, een waterstofauto op basis van een Mercedes A-klasse. Inmiddels hebben alle grote merken wel een waterstofauto in ontwikkeling of op de markt: BMW, Toyota, Honda. Allemaal schrijven ze met trots over de auto die volledig schoon is. *Keine Abgase! Pollution-Free!* Een waterstofmodel is goed voor het imago, maar erg praktisch is-ie nog niet.

Ook Arnold Schwarzenegger, in zijn rol als gouverneur van Californië, probeert zijn groene imago te versterker met een waterstofauto: een Humvee nog wel. Het ding wordt 'Carbon Terminator' genoemd, maar men verzwijgt doorgaans dat Arnie nog vijf andere Hummers heeft die gewone brandstof slurpen.

Brandstofcellen maken de waterstofauto's duur (hoewel ze, net als computers, ieder jaar goedkoper worden) en daarnaast is het lastig tanken. Een kip-en-ei-probleem, constateert Mallant. Niemand koopt een waterstofauto omdat er geen pomp voor is, en er komt geen pomp omdat niemand op waterstof rijdt. Met één uitzondering: op 25 april 2003 opende Shell een waterstofpompstation in Reykjavik op IJsland. Het voorziet een drietal stadsbussen van brandstof. Ook in Amsterdam rijden er twee bussen op waterstof die elke ochtend in de remise worden bijgetankt met waterstofgas onder hoge (300 atmosfeer) druk. De bussen rijden alleen in Amsterdam-Noord omdat de cilinders met waterstof op het dak de bus te hoog maken voor viaducten en spoorbruggen in het centrum. Rotterdam is van plan het voorbeeld te volgen met twintig waterstofbussen in 2009.

Voorlopig lijkt dat de niche voor het rijden op waterstof: stadsvervoer met een eigen tankvoorziening. Ronald kan zich ook voorstellen dat pakketdiensten er baat bij hebben, zeker als waterstofvoertuigen bepaalde privileges krijgen in de stad ten opzichte van hun concurrenten met dieselmotoren. Maar een particulier is voorlopig beter af met een hybride auto, zoals de populaire Toyota Prius of de Hybrid Honda. Die conclusie trokken twee onderzoekers van het Massachusetts Institute of Technology al in 2003. In het blad *Science* schreven ze: 'Brandstofcelvoertuigen met waterstof uit fossiele brandstof hebben geen beter rendement dan hybride voertuigen. We concluderen dat de prioriteit bij overheid en bedrijfsleven bij de ontwikkeling van hybride voertuigen zou moeten liggen.'[65]

De auteurs hebben het hier over waterstofgas uit fossiele bron. Die benaming gaat op voor 90 procent van de waterstof. Uit het oogpunt van beperking van CO_2-uitstoot heeft de waterstofauto alleen voordeel als de waterstof uit duurzame bron afkomstig is. Dus bijvoorbeeld opgewekt met groene stroom. Maar dat is slechts voor 10 procent van het waterstof het geval. De meeste toepassingen zien er erg schoon uit, maar de CO_2-uitstoot vindt elders plaats. Bij waterstof moet je altijd vragen naar de herkomst van het spul, want die bepaalt hoe schoon en duurzaam de toepassing werkelijk is.

Hoe werkt de brandstofcel?

De brandstofcel (engels: *fuel cell*) werd in de jaren zestig ontwikkeld met het oog op elektriciteitsvoorziening aan boord van ruimteschepen. Het idee was al meer dan honderd jaar oud. Zo bouwde Sir William Robert Grove in Wales al in 1843 een werkende brandstofcel. Na de tweede wereldoorlog maakte de Britse ingenieur Francis Thomas Bacon een brandstofcel met 5 kilowatt vermogen en op Amerikaanse landbouwbeurzen reed in 1959 een stille tractor rond met brandstofcellen. De NASA zocht naar een mogelijkheid om brandstof (in het geval van raketten: waterstof) direct om te zetten in elektriciteit. En dat is precies wat de brandstofcel doet met als handig bijproduct: drinkwater voor de bemanning. Vliegtuigfabrikant Pratt & Whitney kochten de patenten op van Bacon voor de VS en ontwikkelden de brandstofcellen voor het Apollo-programma.

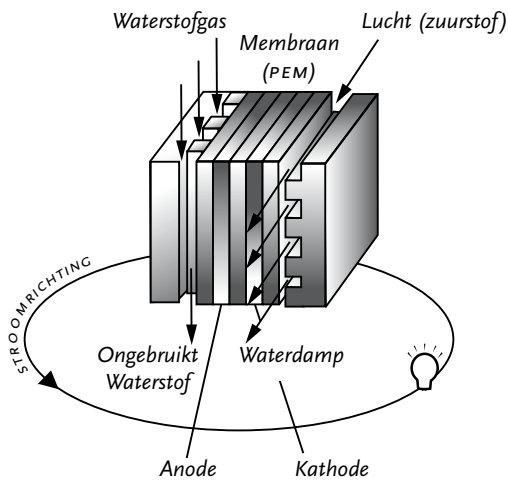

FIG.26 Opbouw brandstofcel

In een brandstofcel gebeurt het omgekeerde van hydrolyse, het bekende proefje van de middelbare school. Daarbij worden twee elektrodes in een bekerglas water gehangen. Zodra er een elektrische stroom loopt, ontstaat er gas aan de elektrodes. Aan de positieve elektrode (anode) ont-

staat zuurstof en aan de andere (kathode) waterstof. De conclusie luidt: elektrische stroom ontleedt water in waterstof en zuurstof.

Het omgekeerde vindt plaats in een brandstofcel: waterstof en zuurstof worden bijeengebracht, gescheiden door een dun folie, het membraan. Het waterstofgas wordt onder invloed van een katalysator (platina) gesplitst in protonen en elektronen. De protonen kunnen door het speciale membraan heen (*PEM* of *proton exchange membrane*) om met het zuurstof te combineren tot water. De elektronen kunnen niet door het membraan en worden omgeleid met een stroomkring. In formulevorm:

Anode: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e$
Kathode: $O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$

De brandstofcel is daardoor bruikbaar als stroombron, met een spanningsverschil van 0,6 Volt. Iedere praktische toepassing maakt gebruik van een stapel (of *stack*) van seriegeschakelde brandstofcellen om op een bruikbare spanning uit te komen.

Inmiddels zijn ook andere typen brandstofcellen ontwikkeld die bijvoorbeeld met aardgas werken. Ook wordt er gewerkt aan omzetters (katalysatoren) die vloeibare brandstoffen als benzine of methanol omzetten in waterstof voor de brandstofcel.

De verschillende typen brandstofcel vallen in twee groepen uiteen. De *PEM* brandstofcel is een voorbeeld van de lagetemperatuurbrandstofcellen die geschikt zijn voor mobiele toepassingen. Van auto tot GSM en laptop, als je de reclame mag geloven. De andere klasse zijn, u raadt het al, de hogetemperatuurbrandstofcellen met een bedrijfstemperatuur van enkele honderden tot duizend graden Celsius. Deze brandstofcellen zijn bedoeld voor stationaire opstellingen en hogere vermogens (10 tot 100 megawatt). Denk aan grootschalige opwekking van warmte en elektriciteit vanuit gas.

Terug in de grond

FIG.27 Foto: Derek MacKay, Shiptalk Ltd.

'Het kwam uit de grond, we sturen het gewoon weer naar huis'

Brian Schweitzer, democratisch gouverneur uit Montana, VS over CO_2-opslag

Een stripper in het lab

'Dit is ons explosievrije lab,' vertelt Paul Feron terwijl hij de deur openschuift. 'Als er een ontploffing plaats zou vinden, wipt het dak een stukje omhoog om de overdruk te laten ontsnappen.' Een geruststellende gedachte.

Feron is onderzoeker bij TNO Apeldoorn en hij werkt hier aan technieken om CO_2 uit een gasstroom te filteren. We doen een plastic brilletje op en lopen naar een opstelling achterin de hal: een stalen frame van drie meter hoog met een aluminium beklede cilinder in het midden. 'Dit is onze stripper,' zegt Feron zonder blikken of blozen. Ik kijk omhoog naar de top van de cilinder, maar Feron wijst me op een kleine, witte kunststofcilinder met het opschrift 'Liquicell'. 'Veel mensen zien het over het hoofd, maar dit is waar het allemaal gebeurt. De grote cilinder erachter dient alleen om vloeistof te verwarmen en weer af te koelen. 'We werken hier met een mengsel van lucht en CO_2. Dat gaat door de stripper en we meten dan hoeveel CO_2 er afgevangen is.' In een kast rechts staan twee identieke apparaten die de hoeveelheid CO_2 in de gasstroom meten. De een geeft 3 procent aan, de ander 1,8 procent. 'Als het apparaat goed ingesteld is, wordt ongeveer de helft van de CO_2 afgevangen. Wil je 90 procent van de CO_2 zuiveren, dan moet je drie tot vier van deze opstellingen achter elkaar zetten. Het gaat ons hier om de optimalisatie van het proces.'

De term 'groen fossiel' hoorde ik voor het eerst in 2004 uit de mond van Shell-topman Jeroen van der Veer, die me bezwoer dat het een zeer belangrijke technologie zou gaan worden. Groen fossiel leek me een contradictie in termen, want hoe kon fossiele brandstof, de aanjager van het broeikaseffect, claimen 'groen' te zijn? Het antwoord was simpel: door de vermaledijde CO_2 af te vangen en op te slaan. Als dat zou lukken, zouden fossiele brandstoffen zonder problemen in gebruik kunnen blijven en dan zou zelfs steenkool een rentree kunnen maken.

Geen wonder dus dat de techniek binnen de gevestigde energiebedrijven op enthousiasme kan rekenen. Bijvoorbeeld bij de Amerikaanse president George W. Bush: 'We geloven allemaal dat technologie grote

mogelijkheden biedt om de uitstoot te verminderen – in het bijzonder de afvang en opslag van kooldioxide.'[66]

Ook dichter bij huis is er enthousiasme. Jip Lenstra, projectleider voor de Toekomstagenda Milieu bij het ministerie van VROM: 'CO_2-opslag maakt het mogelijk om veel langer van fossiele brandstoffen gebruik te maken zonder de atmosfeer aan te tasten. Het is een aantrekkelijke manier om emissies van broeikasgassen voldoende te reduceren om klimaatverandering te beperken.'[67]

Het geloof in 'groen fossiel' vormde de drijvende kracht achter het zogenaamde CATO-project, (CO_2 Afvang Transport en Opslag) dat in 2004 werd opgericht. Het staat onder voorzitterschap van Erik Lysen, een actieve en sportieve vijftiger – hij fietst dagelijks heen en weer tussen Utrecht en Amersfoort – die tevens directeur is van het Utrechts Centrum voor Energieonderzoek (UCE). Hij staat met onder anderen Wim Turkenburg, Kornelis Blok en Jip Lenstra aan de wieg van de CO_2-technologie.

Aan het eind van de jaren tachtig werden daar in Utrecht de eerste plannen voor gesmeed. Maar het zou vijftien jaar duren voordat de CO_2-problematiek, met dank aan het broeikaseffect, stevig op de agenda kwam te staan. In het huidige CATO-project zijn 15 verschillende instanties samengebracht waaronder bedrijven (Shell, NAM, Gasterra, EBN, Kema en Ecofys), onderzoeksinstituten (TNO en ECN), universiteiten (Utrecht, Leiden, Delft en Twente) en natuurorganisaties (Stichting Natuur en Milieu, Greenpeace en Wereldnatuurfonds). Het programma loopt tot 2008 en gaat 29 miljoen euro kosten, waarvan een kleine 13 miljoen uit de aardgasbaten afkomstig is.

Volgens Erik Lysen heeft Nederland goede mogelijkheden voor CO_2-opslag. Lege aardgasvelden en waterreservoirs diep onder de grond (aquifers) bieden een geschatte opslagcapaciteit voor 10.000 miljoen ton, haast vijftig keer de totale jaarlijkse uitstoot van CO_2 in Nederland (220 miljoen ton CO_2 per jaar). Over 30 tot 40 jaar zou CO_2-opslag volgens Lysen de nationale uitstoot met een derde kunnen verminderen.[68]

IEA: CO_2-opslag eerst bewijzen

In het rapport World Energy Outlook 2006 van het Internationale Energie Agentschap IEA wordt nog geen rekening gehouden met opslag van CO_2.

Het agentschap licht die keuze ook toe. De techniek bestaat uit afvang van CO_2 uit rookgassen, transport en ondergrondse opslag in geschikte geologische structuren. De afzonderlijke onderdelen zijn weliswaar op verschillende plaatsen op de wereld in gebruik, maar er is weinig ervaring met de combinatie van die drie in een geïntegreerd afvang- en opslagsysteem, stelt het rapport.

Afvang en opslag bij een kolencentrale, de toepassing waar het meest van verwacht wordt, is nog niet gerealiseerd. Vandaar dat het IEA er bij het doorrekenen van de verschillende scenario's geen rekening mee gehouden heeft.

Wel meldt het IEA dat wanneer alle elf voorgestelde projecten van CO_2-opslag bij kolencentrales inderdaad gerealiseerd worden, er 15 miljoen ton CO_2 minder uitgestoten wordt in 2015. Dat is overigens slechts 0,2 procent van de totale van steenkool afkomstige CO_2.

CO_2-opslag kan volgens het IEA op langere termijn (2050) een belangrijke beperking van de uitstoot teweeg brengen, met name in snel groeiende economieën met grote kolenreserves. In China dus, en India. Maar dat zal alleen gebeuren als er in de komende tien jaar minstens tien grote commercieel levensvatbare kolencentrales met CO_2-opslag gerealiseerd worden. Het agentschap verwacht dat zoiets alleen mogelijk is wanneer de uitstoot van kooldioxide geld gaat kosten.

Het onderzoek bevindt zich nog in een pril stadium. De test in Apeldoorn bouwt voort op een beproefde technologie uit de olie- en gasindustrie. Aardgas bevat van nature soms grote hoeveelheden CO_2, terwijl 2 procent het maximum is voor aardgas in pijpleidingen. De oplossing daarvoor is het 'scrubben' van het gas, waarmee het CO_2 aan het gasmengsel onttrokken wordt. Dat gebeurt ook in Apeldoorn. Door de witte cel stroomt het mengsel van lucht en CO_2 door dunne rietjes die omspoeld worden door een basische amine-oplossing die makkelijk CO_2-moleculen bindt. De rietjes zijn doorlatend voor gasmoleculen, maar dicht voor vloeistof. De vloeistof neemt een deel van de CO_2 uit het gasmengsel op. Na de uitwisseling in de kolom verwarmt men de vloeistof, waardoor de CO_2 in zuivere vorm vrijkomt en weggevoerd wordt. De amine-oplossing is na afkoeling weer klaar voor hergebruik. Bij iedere passage door de kolom wordt ongeveer de helft van de CO_2 uit het gasmengsel verwijderd.

De volgende fase in het experiment is de opschaling en het werken met echte rookgassen in plaats van de keurige gasmengsels uit cilinders. Paul Feron (TNO) vertelt dat in 2007 een opstelling bij een centrale van Eon op de Maasvlakte in gebruik zal worden genomen. 'Voor ons betekent dat een opschaling met een factor 100. We gebruiken dan een deelstroom van een tiende van de rookgassen van de centrale. Wat het moeilijk maakt, is dat de rookgassen behalve CO_2 ook allerlei andere gassen bevatten zoals zwavel- en stikstofoxides en ook vuil en stof.' Het is afwachten hoe de membranen zich houden onder zulke omstandigheden. Het is denkbaar dat zich afzettingen in de kolom gaan vormen, waardoor die dichtslibt. 'Uiteindelijk hebben we nog een factor 1000 te gaan,' weet Paul Feron. De afvang uit rookgassen is niet de enige manier van CO_2-zuivering, maar wel één die aan bestaande centrales toegevoegd kan worden. Daarom gaat daar nu de meeste aandacht naar uit.

Afvang van CO_2 vóór de verbranding is ook mogelijk en wordt nu al toegepast bij de industriële productie van waterstof.[69] Aardgas (CH_4) wordt daarbij behandeld met stoom en lucht waardoor een mengsel van koolmonoxide (CO) en waterstof (H_2) ontstaat. In een tweede stap reageert het koolmonoxide met stoom tot kooldioxide (CO_2) en waterstof. In een elektriciteitscentrale op aardgas die op zo'n manier werkt, wordt het CO_2 al voor de verbranding afgevangen en is waterstof de brandstof.

Een derde variatie heet *oxyfuel*. Hierbij wordt zuurstof met 95 procent zuiverheid gewonnen uit de lucht. Bij verbranding ontstaat een hoge concentratie van CO_2 die direct geschikt is voor opslag. Deze laatste methode is nog niet op industriële schaal toegepast.

Afvang van CO_2 is maar de helft van de oplossing. Het moet ook opgeslagen worden. Voor eeuwig. Volgens Erik Lysen is in Nederland opslag in opgebruikte gasvelden de beste optie. Immers, ook het aardgas heeft er miljoenen jaren opgesloten gezeten, dus je kunt er vanuit gaan dat er geen lekken optreden. Dat laatste is van groot belang. Niet alleen zou het zonde zijn van alle moeite en schadelijk voor het milieu als het moeizaam afgevangen CO_2 stiekem weer in de atmosfeer belandt, het zou ook heel gevaarlijk kunnen zijn voor omwonenden. CO_2 is namelijk zwaarder dan lucht, zodat een grote hoeveelheid ontsnapt CO_2 zich als een verstikkende deken over de grond verspreidt. Het meest dramatische voorbeeld daarvan is de ontsnapping van een grote natuurlijke CO_2-bel uit een kratermeer bij Nyos in Kameroen. Dat gebeurde op

12 augustus 1986. Als een dodelijke mist rolde het gas de helling af, waarna het 1800 mensen verstikte en duizenden stuks vee tot 23 kilometer in de omtrek.

'Er zit al heel veel CO_2 in de bodem,' zegt Lysen. 'Bovendien zit het niet in een holte, maar net als aardgas in de poriën van het gesteente. In Slochteren hebben we over 40 tot 50 jaar, als het veld is uitgeput, een enorme opslagcapaciteit. Maar eerder zijn er al kleinere velden die uitgeput raken of ook waterlagen of lagen met steenkool die voor opslag in aanmerking komen.' De injectie van CO_2 vergt een installatie die vergelijkbaar is met een gasboortoren. Vandaar dat CO_2-afvang en opslag waarschijnlijk beperkt zal blijven tot enkele grote centrales, puntbronnen in het jargon. Die zijn goed voor ongeveer 40 procent van de fossiele CO_2-uitstoot. De kosten voor opslag van CO_2 in de bodem worden geschat op 10 euro per ton.

Injectie van CO_2 in de bodem kan ook lonend zijn. Het wordt al gebruikt in de olie-industrie om de laatste taaie olie uit een veld te persen. Volgens Kenneth Deffeyes, auteur van *Beyond Oil* is oliewinning momenteel zelfs de grootste markt voor CO_2-injectie. Niet alleen zet het de olie onder druk, de olie wordt er ook vloeibaarder door. Vanuit milieuoogpunt is het paradoxaal om CO_2 in de grond te pompen met als doel er meer fossiele brandstof uit te pompen, waardoor extra CO_2 in de atmosfeer komt. Paard achter de wagen zou je denken. Maar het gebeurt, want het loont. Ook gasvelden zijn door CO_2-injectie beter leeg te krijgen. En bij injectie in steenkoollagen verdrijft het CO_2 het aanwezige methaan, wat dan weer gewonnen kan worden.

Wat is eigenlijk de verhouding tussen de hoeveelheid opgeslagen CO_2 en de CO_2 die door verbranding van de extra gewonnen brandstof vrijkomt? Bij Schotland bijvoorbeeld wil BP CO_2 injecteren in het Miller Field om de oliewinning te verbeteren. Daardoor gaat het veld naar schatting twintig jaar langer mee. Het levert dankzij CO_2-injectie naar schatting 40 miljoen vaten olie in 20 jaar tijd. Jaarlijks wordt er 1,3 miljoen ton CO_2geïnjecteerd.[70] 40 Miljoen vaten (159 liter per vat) komt overeen met 6.360 miljoen liter, is ongeveer 6 miljoen ton olie. Bij verbranding levert dat ongeveer 3,5 keer zoveel CO_2 op, dus 22 miljoen ton CO_2. Dat is ongeveer evenveel als er in twintig jaar aan CO_2 in de bodem is opgeslagen. De CO_2-balans is ongeveer neutraal.

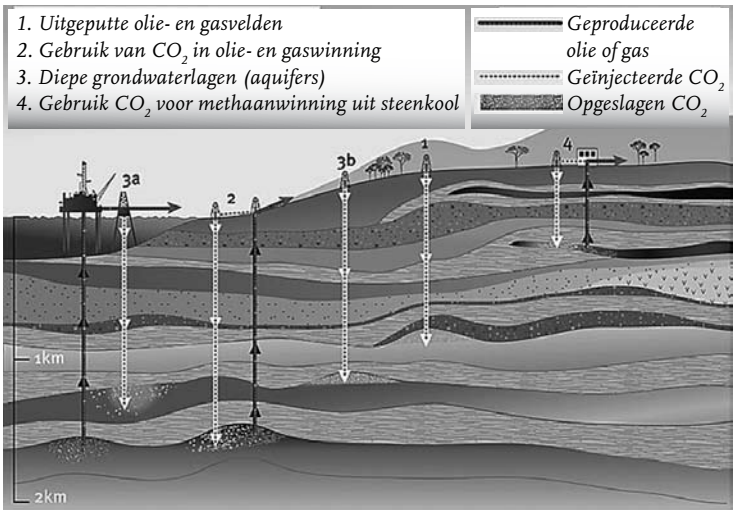

FIG.28 Verschillende mogelijkheden voor CO_2-opslag in de bodem. - Bron: IPCC

Voor welke methode van CO_2-afvang en opslag ook gekozen wordt, het kost altijd energie, het verlaagt daardoor de efficiëntie van de centrale en het kost extra. Volgens Erik Lysen gaan de productiekosten van 4 cent per kilowattuur 1 tot 2 cent omhoog. Dat is een forse stijging, maar omdat de consumentenprijs door bijtelling van transportkosten en andere heffingen ongeveer 20 cent per kilowattuur bedraagt, is de stijging voor een huishouden procentueel een stuk minder. Een gemiddeld huishouden met een verbruik van 3300 kilowattuur zou voor CO_2-opslag jaarlijks 30 tot 70 euro extra betalen op een stroomrekening van 660 euro.

Of CO_2-opslag lonend is, hangt af van het prijskaartje dat er aan de CO_2-emissie hangt. Op 1 januari 2005 is binnen de Europese Unie het handelssysteem in emissierechten van start gegaan. Energiehongerige bedrijven in de cement, papier, metaal, glas en elektriciteit hebben een maximale CO_2-emissie toegewezen gekregen. Als die overschreden dreigt te worden, kan het bedrijf de uitstoot verminderen door minder te produceren of door het productieproces efficiënter te maken, maar het kan ook emissierechten kopen van een ander bedrijf.

Door de emissiehandel heeft de uitstoot van CO_2 een prijs gekregen, die nu in de orde van 10 euro per ton CO_2 ligt.[71] Strippen of scrubben kost volgens Lysen momenteel 40 tot 50 euro per ton en daar komt nog 10 euro bij voor de opslag. Het is nu dus een stuk goedkoper om de CO_2 door de schoorsteen te jagen. Daarin komt pas verandering als de

techniek voor CO_2-afvang twee tot drie keer goedkoper wordt en als bovendien de prijs voor CO_2 omhoog gaat. Dat laatste is afhankelijk van het vervolgscenario op het Kyoto-protocol, dat de CO_2-emissies na 2012 moet gaan regelen. Kort gezegd: hoe stringenter de regels, hoe hoger de emissierechten en hoe interessanter CO2-opslag wordt. Erik Lysen schat dat vanaf een prijs van 20 euro per ton CO_2-opslag commercieel haalbaar wordt. Gevraagd naar de vooruitzichten, zegt Lysen dat hij de eerste centrale met CO_2-opslag rond 2014 verwacht en dat rond 2020 de techniek commercieel interessant genoeg is om grootschalig te worden toegepast. Als dat zo is, zou over 30 tot 40 jaar een derde deel van de CO_2-uitstoot in Nederland opgeslagen kunnen worden.

'Maar dat is een slechts deel van het verhaal,' benadrukt Lysen. 'Ik heb het graag over de Trias Energetica. Die bestaat uit energiebesparing, ontwikkeling van duurzame bronnen en CO_2-opslag. Je hebt ze alle drie nodig om de CO_2-uitstoot terug te brengen.'

CO_2 als grondstof

'Kooldioxide moet je niet onder de grond stoppen, je moet het hergebruiken,' vindt Isaac Berzin van het bedrijf *Greenfuel Technologies* in Cambridge, Massachusetts. 'Elektriciteitscentrales stoten CO_2 uit, algen maken er suikers en olie uit. Het is tijd om beide samen te voegen. Dat zou de uitstoot van kooldioxide aanzienlijk kunnen verminderen.'

Greenfuel heeft momenteel een testopstelling ter grootte van een vrachtwagen op het terrein van de *Redhawk* elektriciteitscentrale in het zonnige Arizona. Het hart van de opstelling zijn twee meter hoge plastic cilinders gevuld met algen en voedingrijk water. Daarvan staan er twintig in de proefopstelling. Rookgassen van de centrale bubbelen door de bioreactoren en de speciale zuur- en hittebestendige algen nemen er CO_2 uit op. De algen gedijen goed op CO_2 en zonlicht. Ze zetten de CO_2 door fotosynthese om in suikers, vetzuren en eiwitten. De groeiende algenpopulatie wordt continu afgetapt, waarna de algen met de afvalwarmte van de centrale gedroogd worden tot geconcentreerde algenkoekjes. Hieruit wordt de algenolie gewonnen die met ethanol in biodiesel wordt omgezet. De rest van de algen wordt met enzymen afgebroken tot suikers die

door vergisting omgezet worden in ethanol. De proefopstelling gebruikt nu een kleine fractie van de rookgassen.

In 2009 hoopt *Greenfuel* in Arizona een eerste algenkwekerij op industriële grootte neer te zetten. De cilinders beslaan dan een oppervlakte van 1 vierkante kilometer. Om alle rookgassen van de 1000 megawattcentrale te benutten, zou de algenkwekerij acht tot zestien vierkante kilometer groot moeten worden. Volgens berekeningen van Berzin zou daar dan jaarlijks 150 miljoen liter biodiesel en 190 miljoen liter ethanol mee geproduceerd kunnen worden.

Overigens komt de door de algen opgenomen CO_2 bij het gebruik van de biodiesel of ethanol alsnog in de atmosfeer terecht. De totale emissie (van centrale èn auto's) halveert dus hooguit.

Ook in Wageningen is men aan algenkweek voor de energieproductie begonnen. De zogenaamde Groene zonnecollector, een bioreactor voor algenkweek, werd bedacht door de Wageningse hoogleraar René Wijffels en ingenieur Obbo Hazewinkel. Maar volgens glastuinder Job van den Burg en ondernemer Eugene Roebroeck is algenkweek voor energieproductie economisch nog lang niet haalbaar. Maar Van den Burg ziet wel andere toepassingen: het kweken van algen als visvoer (in 2006 werd de eerste partij geleverd aan het Rotterdamse Oceanium) of als grondstof voor het vermaarde visvetzuur omega-3. 'Dat spaart ook CO_2 uit,' rekent Roebroeck voor in een nieuwsbericht (13 juni 2006) van het innovatieagentschap SenterNovem, 'want voor 1 liter visolie, waar gemiddeld 25 procent omega-3 vetzuur in zit, is 10 kilo vis nodig. Daarvoor verstookt een kotter 35 liter stookolie. De productie van algen, met daarin een zelfde percentage omega-3 vetzuren, kost maar een fractie van deze energie. Misschien is dit wel het nieuwe product waar de hele tuinbouwsector op zit te wachten om uit de rode cijfers te komen.'

Biomassa

FIG.29

'Als je de totale Amerikaanse oogst van 2004 aan maïs en soja om zou zetten in biobrandstof, is dat net genoeg om Amerika 12 dagen op te laten rijden, of 3,3 procent van de jaarlijkse brandstofconsumptie.'

Ted Lofstrom, Ellis & Associates, Minneapolis, VS

Gedetineerden douchen duurzaam

De zuidrand van Lelystad is een soort gedoogzone met het vliegveldje, een gewone gevangenis en een jeugdgevangenis. Daartussen, aan de voet van de spoordijk, staat de Nuon- biomassacentrale. Vier ineengebouwde blokken met hout en platen bekleed en een hoge groene schoorsteen aan de zuidzijde. Vensters of een ingang zijn moeilijk te ontdekken. Twee maal daags komen hier vrachtwagens veertig ton houtsnippers lossen. De centrale voorziet daarmee 6000 woningen en de twee gevangenissen van CO_2-vrije warmte en deels ook van stroom. De gedetineerden douchen duurzaam.

Ik heb afgesproken met operator Henk Bulder, prachtige naam. Een forse vent in spijkerjasje, 55 jaar met stroblond haar en een rafelige snor. Hij praat met een scherpe stem, wat in de herrie van de centrale goed van pas komt, en met een noordelijk accent. 'Ze denken altijd dat ik een Fries ben, maar ik kom uit Groningen.'

FIG.30 De biomassacentrale Lelystad. – Foto: Nuon

We beginnen de rondleiding bij de weegbrug. Vrachtwagens worden hier bij aankomst en bij vertrek gewogen. Het verschil geeft de hoeveelheid geleverde houtsnippers. Die zijn een centimeter of acht lang en afkomstig van grof tuinafval (de takkenroutes), van aangeplante bossen in de omgeving en van bermbegroeiïng. Populieren, wilgen, coniferen, essen en meer in een geurige mix. De vrachtwagen rijdt achteruit een talud op en kiepert de lading in een van de twee stortbunkers.

Uit de diepe kuil stijgt een intense boslucht op. Van hieruit worden de houtsnippers naar binnen gebracht door een transportmechanisme diep onder het hout. Een andere schakelaar gaat om en een zwaar onderaards gebulder klinkt op uit de kuil. De oppervlakte van de houtberg trilt ervan en langzaam, heel langzaam zakt het niveau in de kuil.

Vroeger moest Bulder nog wel eens de kuil in, vertelt hij. Dan was de transportband blijven steken. Hij ging dan gewapend met een schep van het trappetje af om te kijken wat er aan de hand was. Dan was er een fiets tussen het hout verzeild geraakt, of een halve wasmachine. Dat gebeurt kennelijk als je een container ergens even laat staan. De laatste tijd is dat minder.

We gaan de centrale binnen. Het is warm en het geraas van machines maakt het praten moeilijk. Langs hoge, groen geverfde stalen wanden van de oven, bukkend onder verschillende pijpen door en dan twee stel metalen trappen op tot in de nok van het gebouw. Een deur door en dan een weldadige stilte. Vanaf een hoog balkonnetje kijk ik in een welhaast kathedraalachtige ruimte. Weinig licht, een enorme kuil in de diepte en weer die bekende bosgeur. Dit is de voorraadbunker. Die is duizend kubieke meter groot. Voldoende voor vier dagen stoken. Per dag gaat er 80 ton hout doorheen, wat overeenkomt met 240 kubieke meter (bij een vochtigheid van 45 procent). Met een buffer van vier dagen zijn net de lange weekends en kerst te overbruggen.

Henk Bulder werkt al 33 jaar voor Nuon. Eerst als onderhoudsmonteur en later krijgt hij steeds meer verantwoordelijkheden. Hij ziet zichzelf als echte techneut. Vanaf het begin is hij bij de biomassacentrale betrokken, waar hij elke hoek kent, en ieder geluid. ‘Je moet hier echt een Willy Wortel zijn,’ vindt Bulder. Nieuwe technieken zorgen altijd voor verrassingen en de eerste drie jaar was er regelmatig gelegenheid om te improviseren en te knutselen. Pas de laatste twee jaar loopt de machinerie storingsvrij. In principe werkt de centrale onbemand en wordt het proces gestuurd door drie computers in het kantoortje. Als er een storing optreedt, gaat er een sms’je uit naar Henk Bulder of naar

een van de collega's. In de zomer gaat de centrale een maand dicht voor onderhoud.

Na dit rustige intermezzo wordt het tijd om de machinerie van dichtbij te verkennen. Henk gaat me voor naar een hydraulisch bediende schuif in een rechthoekige verticale buis van een halve meter breed. Hij steekt zijn vinger op: let op. In het geraas van geluiden heeft hij een tikje gehoord dat de opening van de schuif aankondigt. En jawel: hydraulische cilinders aan weerszijden strekken zich en de schuif gaat opzij. Henk wijst naar de schuine pijp erboven. Er begint een wieltje te draaien. Dat betekent dat de transportband nu loopt. Houtsnippers komen vanuit de voorraadbunker omhoog naar de oveninvoer. De snippers vallen van de transportband en door de geopende schuif naar beneden. Even later sluit de schuif.

Achter de groene metalen wanden bevindt zich een gemetselde stookruimte van zes meter breed en twaalf meter hoog. In de eerste paar meters wordt het hout gedroogd, daarna vliegt het in de fik en verderop wordt de hitte steeds hoger opgevoerd door de hete luchtmassa's die er doorheen worden gejaagd. Aan de andere kant van de oven kun je door een klein rond venstertje in het vuur kijken. Een fascinerend gezicht, maar de hitte en het helse kabaal maken het geen plek waar je zou willen zitten als voor de open haard. De hitte zit bovenin de oven in de rookgassen, die een temperatuur tot 1200 graden bereiken. Die gassen stoken de stoompijpen bovenin de oven letterlijk roodgloeiend. Heet water wordt hier tot stoom gestookt dat nog een keer terugkeert naar de oven om er zogenaamde 'oververhitte stoom' van te maken: 400 graden bij 28 atmosfeer.

FIG.31 Henk Bulder bij het hart van de centrale. – Foto: Nuon

Die zinderende stoom raast door een stoomturbine in een ruimte aan de overkant. Wanneer de deur opengaat, word je overrompeld door het geraas. Ik kan nog net een turbine onderscheiden en verderop een generator aan dezelfde as. Ik heb het gezien, mooi. Gauw dicht die deur.

De centrale levert dus elektriciteit en warmte, of eigenlijk andersom want 6,5 megawatt van de energie is warmte en maximaal 1,5 megawatt elektriciteit. De warmte is voldoende voor 6000 huishoudens die aangesloten zijn op de stadsverwarming. De elektriciteit (gemiddeld 0,9 megawatt) is voldoende voor ruim 2000 huishoudens. De balans is nog te verschuiven door een tweede stoomturbine in te schakelen die op lagere druk werkt. De centrale levert dan meer stroom (maximaal 1,6 megawatt) en minder warmte (3 megawatt). Het gezamelijk rendement (warmte en elektriciteit in vergelijking met de verbrandingswaarde van het hout) bedraagt volgens Bulder 85 procent. Hij is dol op 'zijn' machine en vertelt met een dromerige blik dat hij thuis ook wel zoiets zou willen bouwen. Ik denk dat hij het nog gaat doen ook: een minibiomassacentrale in de achtertuin en dan lekker willywortelen.

Maar in de centrale van Lelystad is het experiment voorbij. Er moet geproduceerd worden. Vanaf 1 april tot half oktober levert de biomassacentrale voldoende warmte voor alle aansluitingen. Toch is er een gasgestookte warmtekrachtcentrale als backup. Daar staan zes gasmotoren stand-by die samen 4 megawatt aan elektriciteit kunnen leveren en 2,7 megawatt aan warmte. In de winter is er meer vraag naar energie dan de biomassacentrale aan kan, dus dan draait de gascentrale ook mee.

Wat is de toekomst voor dit soort centrales? Het concept werkt volgens Bulder als je voldoende bos- en tuinhout hebt binnen een straal van 25 kilometer. In het geval van Lelystad komt 80 procent van de brandstof daar vandaan. Maar dat is niet hoe Nederland er uitziet: dorpen van 6000 inwoners op vijftig kilometer uit elkaar. In Scandinavië is zoiets voorstelbaar, maar hier minder. Het is dus niet waarschijnlijk dat we veel van dit soort gezellige buurtcentrales in Nederland zullen krijgen.

Volgens Bulder ligt de toekomst van de stook van hout vooral in de bijstook in kolencentrales. Een kwestie van bijmengen van biobrandstof waardoor de effectieve CO_2-uitstoot vermindert. Daarbij gaat men er vanuit dat houtstook CO_2-neutraal is omdat de bossen evenveel CO_2 opnemen als de schoorstenen op houtstook uitstoten. Dan moeten kap en groei uiteraard wel met elkaar in evenwicht zijn, en dan vergeten we

voor het gemak de energie die gepaard gaat met de kap, het versnipperen en het transport van de biomassa.

Volgens de voorlichter van Nuon, David Uitdenboogaard, wil Nuon met de centrale in Lelystad vooral ervaring opdoen met de behandeling van biomassa. Het is niet de bedoeling om meer van dit soort centrales te bouwen. In plaats daarvan zet het bedrijf in op grootschalige centrales die een mix van brandstoffen aankunnen: aardgas, kolen en biomassa. De centrale in het Limburgse Buggenum is daar een voorbeeld van. De centrale maakt naast maximaal 30 procent biomassa gebruik van kolenvergassing, een nieuw en volgens de voorlichter schoon procedé, dat veel belangstellenden uit de Verenigde Staten en China trekt. Met 250 megawatt is de installatie in Buggenum nog relatief bescheiden. In Groningen, aan de Eemshaven, plant Nuon een joekel van 1200 megawatt, die ook met kolen, gas of biomassa gestookt kan worden. Dus geen kleine buurtcentrales, maar grootschalige multifuel is de strategie van het energiebedrijf.

Groen gas

‘Aardgas’ uit biologische bron trekt de laatste tijd veel belangstelling. Geen wonder ook, want biogas of groen gas, zoals het genoemd wordt, past uitstekend in de Nederlandse aardgasinfrastructuur en het is bovendien CO_2-neutraal. Maar leidingbeheerder Gasterra stelt wel hoge eisen aan het gas. Dat moet ook wel omdat alle aangesloten apparatuur zoals HR-ketels en gasfornuizen geoptimaliseerd zijn voor aardgas. Je wilt niet het risico lopen dat miljoenen branders gaan walmen of teerachtige aanslag ontwikkelen. En juist die hoge eisen van zuiverheid maken de productie van groen gas tot een hightechstaaltje van procestechniek.

Houtvergassing is een oud proces. In filmpjes uit de Tweede Wereldoorlog zijn soms auto’s te zien die met een merkwaardige ketel zijn uitgerust, soms zelfs op een aanhangwagen. In zo’n ketel werden houtsnippers gedeeltelijk verbrand waardoor een brandbaar mengsel ontstond van koolmonoxide en waterstofgas, waar de automotor op kon lopen. Dat er ook teer, ammoniak en zwaveldampen bij vrijkwamen, interesseerde toen niemand. Het reed!

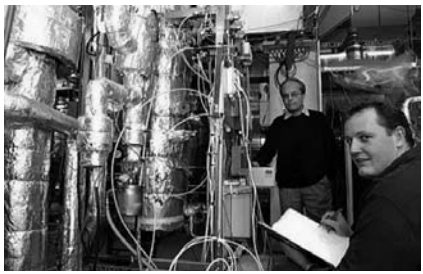

FIG.32 Hamid Mozaffarian (l) en collega-onderzoeker Robin Zwart bij de ‘Groen Gas’-productie-installatie. – Foto: John Oud voor ECN

Zestig jaar later experimenteren Hamid Mozaffarian en Robin Zwart bij ECN met hetzelfde proces, maar dit keer onder zeer gecontroleerde omstandigheden. ‘Het gas dat we hier maken is methaan dat kwalita-

tief gelijk is aan aardgas,' zegt Mozaffarian trots. Hij is een kleine man met een serieuze blik achter het stalen montuur. Hoog voorhoofd en een overhemd onder zijn trui. Hij heeft me binnengelaten in het ECN-laboratorium, waar ik tegenover de vele met gevoerd aluminiumfolie ingepakte cilinders probeer uit te vinden wat hier gaande is. Hier wordt volgens het wetenschapsblad *Nature* pionierswerk verricht op het gebied van biomassavergassing.[72] Maar van het proces zelf is weinig te zien omdat het zich binnen de cilinders afspeelt.

In 1999 haalde Mozaffarian de pers met een proces dat waterstofgas omzette in methaan. De gedachte was toen om waterstofgas, dat in de belangstelling kwam als universele brandstof, hanteerbaarder te maken door het aan koolstof te binden. Het zou zo in die vorm goed in te passen zijn in de Nederlandse aardgasstructuur. Het heette geen groen gas, maar synthetisch natuurlijk gas of SNG. Mozaffarian: 'Het was bekend dat je SNG kunt maken door waterstofgas over gloeiende kolen te leiden. Duitsers, Engelsen en Amerikanen slaagden daar in de jaren dertig voor het eerst in en in 1983 bouwden Duitse ingenieurs in Rheinbraun een installatie die 240 ton kolen per dag in SNG kon omzetten.'

Maar dat was niet wat Mozaffarian voor ogen had. Hij wilde een koppeling maken tussen waterstofgas en biomassa. 'Stel nu, dachten we, dat je waterstofgas, dat in de toekomst steeds meer geproduceerd zal worden, over gloeiende biomassa voert, schilfers van wilgen bijvoorbeeld, of zelfs afval. Dan sla je vier vliegen in één klap. De gebonden waterstof is beter handelbaar, de berg afval wordt kleiner, het Groningse aardgas raakt minder snel op en het proces is CO_2-neutraal.' Mozaffarian maakte een computermodel van de hydrovergasser en de uitkomsten daarvan waren veelbelovend: het SNG zou minstens zo goed branden als aardgas en even schoon zijn.

Vier jaar later, als ik hem in het laboratorium opzoek, is de opzet iets veranderd. Mozaffarian betrekt zijn waterstof niet meer van buiten, maar produceert het in de eerste stap van de opstelling door houtvergassing. 'We laten houtsnippers bij 800 tot 850 graden Celsius verbranden met weinig zuurstof. Bij die gedeeltelijke verbranding ontstaan brandbare gassen zoals methaan, koolmonoxide, waterstof en kooldioxide. Maar ook andere gassen en stofdeeltjes.' Het is een melange die qua geur onmiddellijk associaties oproept met open haard en gezellige winteravonden, maar die de onderzoekers bij ECN heel wat hoofdbrekens heeft bezorgd. Mozaffarian wijst op een volgende cilinder en zegt: 'Hier komt het houtgas op een keramische filter. De temperatuur is daar

400 graden. Het filter houdt alle stofdeeltjes tegen. Daarna kan het gas gereinigd worden.'

De eerste stap van de reiniging is een oliewassing. In een gepatenteerd filtersysteem met de naam OLGA[73] komt het gas in een absorptiekolom in contact met een reinigende olie die alle teercomponenten uit het gas opneemt. In een tweede stap staat de olie de teerbestanddelen op zijn beurt af aan een luchtstroom, die de teerdampen terugvoert naar de vergasser, waar ze onder hoge temperatuur in kleinere moleculen uiteenvallen.

Het gewassen houtgas gaat door naar de derde reinigingsstap, de waterwassing, waar het ammoniak weggefilterd wordt evenals de chloorverbindingen. Zwavelverbindingen worden in een aparte stap verwijderd met zinkoxide. Wat er dan overblijft, is een schoon mengsel van waterstof, koolmonoxide en kooldioxide dat onder katalyse wordt omgezet in methaan. De katalysatoren die nodig zijn voor de zogenaamde methanisering, zijn erg gevoelig voor verontreinigingen door teer en zwavel, zodat gasreiniging van groot belang is voor de levensduur van de apparatuur. In een duurtest van 150 uur liep de activiteit van de katalysator wel iets terug, maar dat gebeurde bij het gebruik van gassen uit gasflessen ook. Met andere woorden, de houtvergassing en de uitgebreide filtering werkten naar tevredenheid. Volgens Mozaffarian bedraagt het rendement van de omzetting van hout naar gas 70 procent. 'Het is nu nog een klein proces, maar we willen het opschalen naar 10 megawatt en dan naar 100 megawatt thermisch. In 2008 moet er in samenwerking met Gasterra een proeffabriek komen aan de Eemshaven in Noord-Groningen. Daar kunnen we geïmporteerde biomassa uit Scandinavië of Rusland omzetten naar groen gas, en het in het gasnet injecteren,' vertelt Mozaffarian enthousiast.

Groen gas is een van de thema's van het Platform Nieuw Gas,[74] dat op zijn beurt een van de zes pijlers is onder het nationale energietransitiebeleid. 'Schoon of klimaatneutraal gas kan de plaats innemen van een gedeelte van het aardgas dat Nederland verbruikt', stelt het platform op zijn website.[75] 'Productie en gebruik van gas van biologische oorsprong (biogas) staat hierbij centraal.' En even verderop staat onder het kopje 'Ambities' de doelstelling voor groen gas: 'Het transitiepad moet leiden tot 10 procent van het gasaanbod uit 'niet-traditionele' bronnen in 2020. Dit komt neer op 5 miljard kubieke meter per jaar.'

Volgens hoogleraar energietechnologie Kees Daey Ouwens (TU Eindhoven) is de beschikbaarheid van brandstoffen geen probleem. 'De

Europese Unie kan zichzelf voor een groot deel van bio-energie voorzien, en daarnaast zijn er goede mogelijkheden voor import. Denk aan de bossen rond Sint Petersburg, die onder FSC-richtlijnen beheerd kunnen worden.'[76]

Maar er is ook kritiek op grootschalige import van biomassa. Je gaat toch niet met bomen lopen slepen die voor de helft uit vocht bestaan, vinden critici. Dan kun je het hout beter ter plekke in gas of brandstof omzetten en dat importeren.

Huishoudelijk gebruik

Het ECN houdt het gemiddelde Nederlandse energiegebruik per huishouden bij. Daaruit blijkt dat sinds 1980 het gasverbruik bijna gehalveerd is, terwijl het stroomgebruik gestaag toeneemt met ongeveer 1,5 procent per jaar.

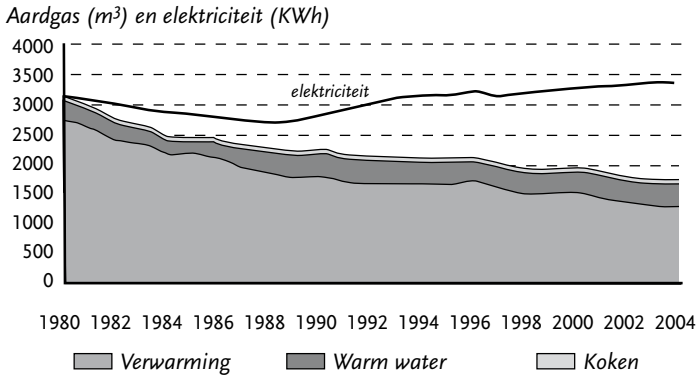

FIG.33 Huishoudelijk energieverbruik in Nederland. - Bron: ECN

Het verbruik van aardgas per huishouden is tussen 1980 en 2004 gestaag gedaald van 3145 m3 naar 1736 m3 (een daling van 45 procent). Het aandeel van ruimteverwarming in het totale verbruik is gedaald van 88 procent in 1980 gedaald tot 74 procent in 2004. Het aandeel voor de bereiding van warm tapwater is in dezelfde periode ruim verdubbeld tot 22%. Het elektriciteitsverbruik per huishouden is vanaf 1988 gestegen van 2740 tot ongeveer 3400 kWh per jaar, hetgeen neerkomt op een groei van bijna 1,5 procent per jaar.

Stroom van de boer

‘Eén motor van 625 kilowatt levert net zoveel op als 350 melkkoeien. En hij vreet ook net zoveel.’ Aan het woord is Henk Eisse, energieboer uit Drente. Vastberaden kop, kalend met grijs haar aan de slapen en een gestreept overhemd onder de blauwe overall. Hij is uit Staphorst verhuisd naar een dorpje vlakbij Stadskanaal, waar je nog de ruimte hebt en lekkere grote kavels. Hij zocht een mogelijkheid om aan zijn twee tienerzonen een bedrijf met toekomst achter te laten. Met melkvee is dat moeilijk omdat de melkprijs ieder jaar daalt, maar elektriciteit daarentegen wordt steeds duurder. En dat biedt mogelijkheden. De boerderij is klassiek wit, omgeven door groen in het weidse Drents-Groningse landschap, maar achter de boerderij staan opvallend grote lage silo’s. En dat is waar boer Eisse zijn hoop op heeft gevestigd.

‘We gaan het rondje doen zo de goederen hier binnenkomen,’ begint Eisse de rondleiding. Ik glibber op mijn stadse schoenen achter hem aan. Volgende keer laarzen mee! De goederen, zo blijkt, bestaan uit maïs en mest. Naast de koeienstal is een weegbrug gebouwd waar vrachtwagens bij aankomst en vertrek gewogen worden. Aan de muur een kastje met display dat met een elektronische sleutel geactiveerd wordt. De computer registreert alles wat binnenkomt: 40 ton ingekuilde maïs per dag, varkens- en koeienmest die vanuit Twente en zelfs vanuit Brabant wordt aangevoerd. Mest en maïs , dat zijn de ingrediënten voor het vergistingsproces dat bij 38 graden Celsius plaatsvindt. ‘Een vergistingsinstallatie is net de pens van een koe,’ vertelt Henk Eisse terwijl we naar een van de tanks lopen waar een platform tegenaan gebouwd is. ‘Het is dezelfde bacterie als in de pens van een koe en het werkt precies hetzelfde. Het gaat ons om de koeienwinden, om het methaan dat eruit komt. Bij een koe kunnen we daar niks mee en hier kunnen ze dat netjes opvangen.’

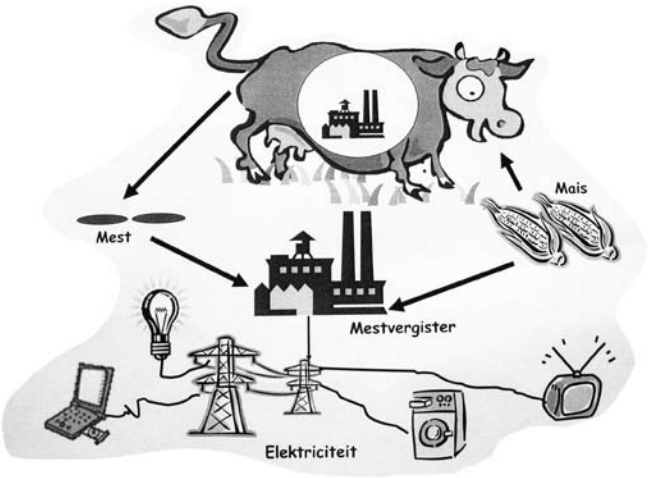

FIG.34 Met deze plaat legt Henk Eisse zelf de werking uit.

Een metalen trap leidt naar het platform naast de ronde silo. Op ooghoogte zijn in de dikke geïsoleerde wand twee ronde vensters aangebracht, een soort diepe patrijspoorten. In de rechter staat een schijnwerper, in de linker kun je je hoofd steken. Henk Eisse sproeit een beetje water langs de binnenkant van het venster en draait een ruitenwissertje rond. Dan legt hij me uit wat ik moet doen: 'Nou moet je met één hand aan de lamp draaien en met je hoofd hierin kijken, dan kun je precies zien wat hier gebeurt. Dan kun je het mooi zien pruttelen en dat het gas uit de smurrie ontsnapt.' Ik steek mijn hoofd in de duistere nis en mijn ogen moeten wennen aan de het donker. Maar dan ziet ik het. Het licht van de lamp scheert over een zacht deinende en draaiende oppervlakte. Het lijkt wel een pan erwtensoep die zachtjes staat te koken. Overal borrelen gasbelletjes uit de prut omhoog. Dat is het dus: de biomethaan die het ballondak van de silo bol blaast.

We lopen tussen de silo's door en ik verbaas me over hoe strak en schoon alles er uitziet. Ik had me wel wat ergers voorgesteld toen ik hoorde dat gewassen en mest de ingrediënten waren. Mest ruik je hier niet. Nou, een klein plasje dan dat een chauffeur heeft achtergelaten toen hij een gierslang te vroeg afkoppelde. Voor de rest is het een opmerkelijk schone en moderne technologie. Duitse technologie, legt Eisse uit, want die hebben het systeem helemaal uitontwikkeld.

Achterop het terrein komen we bij een transportband met bovenaan een soort metalen anus waaruit een vezelige bruine massa rolt. Dit is

het eind van de keten. Waar tien ton maïs en mest in gaan, hou je aan het eind van de lijn negen ton 'digestaat' over. Een lichtbruine, vezelige consistentie die, het moet gezegd, nauwelijks ruikt. Of in ieder geval niet naar gier of mest. Eisse pakt een handje en biedt het me aan. Ik snuffel even en ruik iets kruidigs. Maar geen poep. Het goedje wordt verkocht als geurarme meststof en keert terug op de akkers.

Wanneer we om de hoek een deur open doen wordt de landelijke stilte verdreven door een luidruchtig gedreun. Eisse gaat me voor: 'We gaan hier de ruimte waar de motoren staan opgesteld binnen en hier is een hels kabaal.' In het gangetje valt het nog mee, maar zodra Eisse een van de zijdeuren opent, is een verder gesprek onmogelijk. In de smetteloze ruimte achter de deur zie ik een manshoge, knalgroene gasmotor met daarachter een generator ter grootte van een centrifuge. Het is een van de twee gasmotoren die lopen op biomethaan. De generator daarachter levert 625 kilowatt. Maximaal vermogen van deze boerencentrale is dus 1,2 megawatt. Bij continu vol vermogen kan boer Eisse ruim 3.000 gemiddelde huishoudens van stroom voorzien.

FIG.35 Henk Eisse bij zijn installatie. – Foto: JW

Voor het laatste deel van de rondleiding lopen we door de koeienstal. Ook hier heeft de hightech zijn intrede gedaan. De koeien kunnen namelijk geheel hun eigen dagindeling maken. Er is plek om beschermd te liggen, wanneer een koe trek heeft steekt-ie z'n kop door het hek en gaat vreten en als de uiers onder spanning komen loopt de koe naar de automatische melkinrichting. ''t Is net als bij de kapper,' vergelijkt

Henk Eisse, 'als er ééntje staat te wachten is het precies goed.' En inderdaad staat er één dier te drentelen voor de ingang terwijl een ander volautomatisch gemolken wordt. Laserstralen bepalen de positie van de spenen en de robot gaat aan de slag. De koeien passen zich aan en zoeken zelf een tijd uit dat het rustig is. Dat kan om drie uur 's ochtends zijn. Ik krabbel een koe over zijn kop, maar die deinst terug. Ze schrikt van de outfit, meent Eisse. Volgende keer ook een overall mee.

Trappetje op en we komen in een kantoor met uitzicht: beneden zijn 290 koeien in alle rust bezig hun ding te doen en hier is op drie beeldschermen de volledige voortgang van de vergistingscentrale te volgen: de inhoud van de silo's, temperaturen en het geleverde vermogen. Alles te sturen met de muis. Als er hier één ding belangrijk is, is het wel continuïteit. 'Wij moeten een continue aanvoer van grondstoffen hebben,' vertelt Eisse, 'en elke dag hetzelfde doen zodat we een continu proces hebben. Dat houdt de bacteriën tevreden en dan produceren ze optimaal.'

De installatie draait nu bijna een jaar en heeft 2,5 miljoen euro gekost. De afschrijvingstermijn bedraagt tien jaar en met de stijgende stroomprijs ziet Henk Eisse de toekomst met vertrouwen tegemoet. Wel was het een tegenvaller toen de MEP-subsidie (Milieueffect ElektriciteitsProductie) plotseling werd ingetrokken. Daardoor krijgen Eisse en andere energieboeren geen 18 eurocent per kilowattuur, maar slechts de helft. Eisse vertrouwt erop dat de maatregel gerepareerd wordt, maar hij kent anderen met soortgelijke installaties in aanbouw die er ernstig door in problemen komen.

In april 2007 maakt het kabinet Balkende IV bekend dat een nieuwe stimuleringsmaatregel voor groene stroom, een opvolger voor de MEP, niet voor juni 2008 te verwachten is. De ondernemersorganisatie van de installatiebranche en de technische detailhandel UNETO-VNI constateert daarop dat het jaar 2007 verloren is om de doelstellingen voor de verduurzaming van de energievoorziening te bereiken.

En dat terwijl vergistingsinstallaties volgens Eisse juist voor verpauperde landbouwgebieden mogelijkheiden bieden. Hij noemt als voorbeeld het gebied rond Erica waar de laatste tuinders aan de stijgende energieprijzen ten onder dreigen te gaan. Het is de laatste bedrijfstak in de regio. Een vergistingsinstallatie zou ideaal zijn in een tuinbouwgebied, omdat de restwarmte (de installatie levert 60 procent warmte en 40 procent elektriciteit) dan goed gebruikt kan worden. Eisse gebruikt nu zelf 10 tot 15 procent van de warmte voor de verwarming van het

bedrijf en het woonhuis, maar het grootste deel wordt door zes grote radiatoren in de lucht geblazen. Terwijl enkele kilometers verderop een bedrijfstak ten onder gaat omdat ze hun kassen niet warm kunnen stoken.

Eisse denkt dat in de toekomst de energieteelt wel eens de hoofdmoot zou kunnen worden in zijn bedrijf. Nu staat de regelgeving alleen stroomproductie toe als nevenactiviteit, als afvalverwerking van het eigen bedrijf als het ware. De inkomsten uit stroom mogen die van de melk niet overtreffen. Geen probleem voor Eisse. 'Papier is geduldig,' vindt hij.

Een installatie van 1,2 megawatt kan een klein dorp (3000 huishoudens) van stroom voorzien en daar is zo'n 250 hectare landbouwgrond voor nodig. Ruim anderhalve kilometer in het vierkant, vergelijkbaar met de grootte van het hypothetische dorp zelf. Eisse denkt dat dat eenvoudig is uit te breiden. Straks wordt het weer net als in de veentijd, zegt hij als ik hem de hand druk. Drente voorzag toen met turf het westen van energie, straks gaat dat met mest. Eens even rekenen: Drente heeft een oppervlak van 2800 vierkante kilometer, daar passen ruim duizend bedrijven op van het formaat van Eisse (250 hetare = 2,5 vierkante kilometer). Dat zou duizend maal drieduizend is drie miljoen huishoudens van stroom kunnen voorzien. Dat is de helft van Nederland.

Bruine energie

Eind 2006 maakte het Groningse poppodium 'De Puddingfabriek' bekend dat ze over zouden stappen op een bijzondere vorm van groene energie. De toiletproductie zou daarbij dienen als voedingsstof. Vergisting daarvan moest gas opleveren voor de stroom. Dat betekende wel dat er voor een concert zo'n tweehonderd mensen zeg maar hun steentje moesten bijdragen. In het persbericht werden buurtbewoners daar dan ook toe opgeroepen. Mooi verhaal. Maar iets te mooi. Overlopen door de media gaven de organisatoren enkele dagen later toe dat het een grap was geweest.

Het verhaal van Brendo Meulman uit Sneek had de inspiratie kunnen zijn. Hij maakt namelijk weldegelijk energie uit poep. Van zijn buren nog wel. Toiletten van het hele straatje van 32 nieuwbouwwoningen zijn aangesloten op de installatie in de garagebox van Meulman.

FIG.36 Brendo Meulman tussen de poepvergistingstanks in zijn garagebox. – Foto: J.W.

Het zijn speciale toiletten met vacuümaansluiting, zoals je die ook in vliegtuigen vindt. Even op de knop drukken en FFFFLOEPP weg is de handel. Slechts een liter water wordt meegespoeld om de pot te reinigen. De keutel vliegt als een komeet door de vacuumbuizen en komt met een doffe plof in een vacuümtank terecht. Van daaruit wordt het naar bewaartanks in de garagebox gepompt. Onderuit die silo's stroomt een langzame gestage stroom in de richting van de vergistingstank. De poep borrelt hierin omhoog door het lauwe water met bacteriën die zich aan de uitwerpselen te goed doen en en daarbij voornamelijk methaan produceren, dat uit de oplossing omhoog borrelt. Het methaan vangt Meulman op in een soort luchtbed bovenin de garagebox. Het residu loopt vanuit de vergistingstank over in een open bak. Het geurt dan wonderlijk genoeg nauwelijks meer. Het methaan verbrandt Meulman in een klein cv-keteltje waarmee hij de vergistingstank op temperatuur houdt. De opbrengst is nog onvoldoende om het huis mee warm te houden.

Brendo Meulman studeerde op het project af aan de Wageningen Universiteit. Nu levert het weinig energie op, vindt hij, maar het spaart wel veel uit. Meulman vindt de bestaande rioleringen met een centrale verwerking een verkwistend systeem. Dat lokaal te doen spaart water, levert gas en ook compost. De gemeente Sneek overweegt om in een volgende nieuwbouwwijk met meer dan 1200 woningen het zelfde systeem toe te passen, liefst uitgebreid met verwerking van het afvalwater van de huishoudens.

Verzengende hitte

Het lab ruikt als een visrokerij. De onmiskenbare geur van gesmoord hout die, zoals ik later te horen krijg, bestaat uit een mengsel van minimaal 162 verschillende chemische componenten. Naast mij loopt Wolter Prins, die hier drie dagen per week hoofd onderzoek en ontwikkeling is. De andere twee dagen werkt hij aan de overkant van de weg aan de Universiteit Twente, bij de vakgroep Thermochemische Conversie van Biomassa. Prins (54) praat met een gemoedelijke Twentse tongval en heeft met zijn grijze haar, idem ringbaardje en vriendelijke oogopslag een bijpassende uitstraling. In zijn kantoor staat het raam ondanks de januaristorm op een kier. De tabaksrook moet er even uit, want Prins mag soms zelf ook graag wat biomassa verbranden. In zijn pijp.

De moeilijkheid van biomassa is dat het een bulky materiaal is, vertelt Prins. Hout gaat nog wel, maar wat moet je met rijstkaf? Dat is voornamelijk lucht. Of anders zaagsel of stro. Daar komt bij dat het gevoelig is voor rot en schimmel. Dat was de aanleiding om een proces te ontwikkelen dat biomassa, in welke vorm dan ook, omzet in een olieachtige substantie.

In het laboratorium van het bedrijf BTG (Biomassa Technologie Groep bv) lopen we langs verschillende opstellingen. In de hal ligt een oude stookketel op zijn kant. De ketel wordt omgebouwd voor de verbranding van bio-olie. Gewoon om te kijken hoe dat gaat. Om de hoek en bukkend onder een paar pijpen door komen we bij een kleine proefopstelling. In de hoek staat een plastic zak waar Wolter Prins een handvol uit haalt. Het ziet eruit als Brinta. Droge kleine schilfertjes, tussen twee en vijf millimeter groot, die als voeding dienen voor het proces. Elektromotoren transporteren de houtsnippers door een buis omhoog en dan, op drie meter hoogte, horizontaal een blikken doos in. De doos is ongeveer een meter in alle richtingen. Dat is de reactor, vertelt Prins. Daar komt het materiaal in een wervelstorm van gloeiend heet zand terecht van 500 graden. Maar doordat er geen zuurstof aanwezig is, verbrandt het hout niet. In plaats daarvan verdampt het. Pyrolyse heet het proces, oftewel: ontleding door hitte. Het hout wordt in moleculaire

stukken geknipt. De grootste moleculen worden kool, maar het merendeel gaat over in damp. De damp gaat vervolgens langs een koele wand van 40 graden en condenseert daar als warme adem tegen een koude ruit. Het druipt naar beneden en wordt opgevangen als bio-olie. De moleculen die hier niet condenseren zijn lichtere gassen zoals methaan, waterstof, koolmonoxide en kooldioxide. Die worden bij de proefopstelling afgefakkeld, want hier gaat het om de olie.

Evert, de procesoperator, draait een kraantje open en onder een luid getik stroomt er een bruine, licht viskeuze olie in de plastic fles. Dat is het dan: de pyrolyseolie met inderdaad een intense rookgeur. De kleine opstelling kan zo'n tien kilo houtsnippers per dag aan, wat een kleine zeven kilo olie oplevert.

FIG.37 Bio-olie uit de proefopstelling. – Foto: JW

'Als je analyseert wat daar allemaal in zit, daar schrik je van,' vertelt Prins. Maar liefst 162 verschillende chemicaliën duiken regelmatig op, waaronder zuren, suikers en fenolen. Misschien zitten er wel heel kostbare moleculen in, wie weet, maar het is vooral lastig omdat het duur is om de verschillende componenten te scheiden.

Vandaar dat BTG ook onderzoek doet naar de afzetmogelijkheden van bio-olie. De energie-inhoud is ongeveer de helft van fossiele olie, dus zal er al gauw twee keer meer biobrandstof nodig zijn. De eenvoudigste vorm van verwerking leek verbranding. Daarvoor heeft BTG eenmalig 8000 liter bio-olie naar Zwolle gebracht om het daar bij te laten stoken in een oude gascentrale. Technisch leverde dat weinig problemen op. Het is volgens Prins gewoon verbranden in een groot fornuis. Maar afschaffing van de MEP-subsidie[77] in augustus 2006 gooide roet in het

eten. De pyrolyseolie werd zonder subsidie te duur en het experiment werd niet voortgezet.

Theoretisch zou je een dieselmotor op bio-olie kunnen laten draaien, maar vanwege de hoge zuurgraad is het nodig om de dieselpomp en het injectiesysteem uit speciaal materiaal te vervaardigen. Fabrikanten hebben daar vooralsnog geen oren naar.

Maar vandaag zijn er mensen over de vloer om nog andere verwerkingsroutes te bespreken: kraken en raffinage. In een olieraffinaderij gaan de restjes (residuen) naar de residuvergasser, waar ze vergast worden tot koolmonoxide en waterstofgas. Dat mengsel heet synthesegas, omdat het tot moleculen van iedere gewenste lengte samengesteld kan worden in een zogenaamde Fischer-Tropsch-reactie.[78] Het wordt in de toekomst wellicht ook mogelijk om bio-olie, na voorbehandeling in een kraker om te laten zetten in synthesegas, waaruit dan benzineachtige producten gemaakt kunnen worden. Een kraker is een robuust ding, dat naar verwachting niet op hol raakt van een beetje pyrolyseolie.
Maar wel moet eerst de zuurstof uit de bio-olie verwijderd worden. Fossiele olie bevat geen zuurstof, maar pyrolyseolie tot de helft. Dat moet eruit voordat de bio-olie bij de fossiele olie kan instromen. Een extra stap in de verwerking, maar toch hebben oliefirma's daar wel belangstelling voor. Naast Shell nemen namelijk ook Total-Arkema en andere instituten deel aan een groot Europees samenwerkingsproject op dat gebied. Prins schat dat het nog wel tot 2017 kan duren voordat daar iets uitkomt.

Onderzoek kost tijd, zoveel wordt wel duidelijk. Het onderzoek bij BTG komt voort uit de Universiteit Twente (toen nog Technische Hogeschool Twente) in het begin van de jaren tachtig. Het onderzoek naar de verwerking van biomassa begon toen in de groep van hoogleraar procskunde Wim van Swaaij bij Chemische Technologie. Van Swaaij kreeg in 2004 de Koninklijke/Shellprijs uitgereikt voor zijn pionierswerk. Maar voor Van Swaaij zelf is het twintig jaar lang een soort hobby geweest, waar collega's vaak verwonderd naar hebben gekeken. Al dat geklooi met hout en stro stak wat primitief af bij de bezigheden in andere laboratoria. Uit die groep van Van Swaaij kwam ook Huub Stassen voort, die voor zichzelf begon met projecten voor ontwikkelingslanden. Hij is de oprichter van BTG. Eerst ontwikkelde Stassen eenvoudige houtoventjes en later ook vergassers van biomassa om elektriciteit mee op te wekken voor een koelkast of een televisie. In 1991 vroeg Stassen aan Wolter Prins om onderzoek en ontwikkeling voor BTG te komen doen. Prins

stemde daarmee in en nam ook een aantal promovendi mee. Ondertussen kwam de omzetting van biomassa opnieuw in de belangstelling door ongerustheid over het broeikaseffect en in 1996 verrees een nieuw gebouw op een industriegebied voor *spin-offs* tegenover de Twentse campus.

De grootste klus van BTG tot nu toe is een pyrolyse-installatie in Maleisië. De Genting groep is een grote Maleisische onderneming met activiteiten in toerisme, energie, papier, informatietechnologie en plantages. Met een beurswaarde van 5 miljard dollar is het een flinke onderneming. Op de palmolieplantages wordt olie gewonnen uit de pitten. Palmolie is geschikt als spijsolie (wereldwijd samen met sojaolie het meest gebruikt) en als grondstof voor de industrie (denk aan Palmolive). Het is een enorme industrie. Genting heeft in Maleisië alleen al 370 plantages. Het probleem was alleen de enorme berg afval waarmee men bleef zitten. Nadat de vruchten en pitten gebruikt zijn, blijven de zogenaamde palmtrossen over. Die kon men hooguit verbranden om daarna de as als mest te verspreiden over het land.

Entree BTG. Genting koos ervoor om dit kleine Nederlandse bedrijfje te laten zien wat het met de palmtrossen aankon en bestelde een pyrolyse-installatie met een capaciteit van 1500 liter per uur, tien keer groter dan de grote demo-installatie die bij BTG in het lab staat. Een joekel van vijf bij vijf meter vloeroppervlak en acht meter hoog. Een installatie met een tien keer grotere capaciteit kon BTG zelf niet bouwen, maar de overbuurman Zeton (‘*the pilot plant specialist*’) wel. Al moest de constructiehal er een paar meter voor opgehoogd worden.

De twaalf meter hoge installatie werd in de hal van Zeton gebouwd en ‘koud’ getest, waarna het hele geval gedemonteerd werd en in januari 2005 op transport gezet naar Maleisië. In april 2005 stond de pyrolyse-installatie op de plantage en kon het proefdraaien beginnen.

Dat bleek nog niet zo eenvoudig. Palmtrossen waren toch een heel ander materiaal dan de houtsnippers waar tot nu toe mee gewerkt werd. Wolter Prins: ‘Daar hebben we lang mee geworsteld, maar we hebben het wel onder de knie gekregen. In vergelijking met hout zit er in palmtrossen veel as, waardoor we er minder olie uit konden winnen. Het viel tegen om het proces aan de slag te krijgen maar het werkt nu.’ Robbie Venderbosch, die voor BTG de opbouw van fabriek in Maleisië geleid heeft, schrijft dat de geproduceerde pyrolyseolie (geen palmolie!) langzamerhand beter werd qua samenstelling. De asinhoud is verminderd

en het watergehalte is teruggebracht tot 25 procent. De oplevering is daarmee zo goed als voltooid.

Mijn tegenwerping dat palmolieplantages zo'n slechte reputatie hebben, ze zouden immers puur voor het gewin regenwoud kappen en daar palmplantages voor in de plaats zetten, wordt door Prins verworpen. De plantages in Maleisië zijn er al tijden in gebruik, zegt Prins. Wat BTG eraan toevoegt, is een manier om het afval, in dit geval de palmtrossen, tot een bruikbaar product te verwerken. De palmolie zelf is geen energiegewas, wat Prins betreft. Nieuwe plantages zoals die de Indonesische overheid op Borneo wil aanleggen, kunnen niet op zijn instemming rekenen.

De pyrolyse-installatie is door twee operators te bedienen, kost tussen de twee en drie miljoen euro en heeft nog wel externe energie nodig. De hitte voor de pyrolyse wordt met houtskool (een bijproduct) gestookt en het benodigd elektrisch vermogen bedraagt circa 150 kilowatt. De restwarmte van het proces wordt gebruikt om de biomassa te drogen. Een volgende stap is het gebruik van een gasmotor die gevoed wordt door de pyrolysegassen en die het elektrisch vermogen voor de installatie zou kunnen opwekken.

'Pyrolyse is vooral een strategisch proces,' stelt Wolter Prins. 'Het stelt je in staat om materiaal dat vooral aanwezig is in landen ver van Nederland, dus in de tropen of in Finland of Rusland, transportabel te maken door er een vloeistof van te maken. In landen rond de evenaar, de Groene OPEC landen zoals wij die noemen, heerst hoge vochtigheid en temperatuur, waardoor het gunstig is om veel biomassa te produceren. Als je dan kijkt naar het afval van bosbouw en afval van plantages, dan is dat materiaal dat moeilijk te transporteren is. Dan kun je beter in de landen waar dat spul geproduceerd wordt een pyrolyseproces neerzetten om residuen om te zetten in bio-olie die je dan transporteert naar het land waar je dat kan gebruiken. De droom die wij rond het pyrolyseproces hebben is: rond de evenaar allemaal pyrolysefabriekjes. De olie die daar geproduceerd wordt, gaat keurig naar de havens en wordt met tankers naar de industriële landen verscheept waar de energie geproduceerd wordt uit die bio-olie.'

Utopisch? Het had weinig gescheeld of de Maleisische reus Genting had een elektriciteitscentrale voor bio-olie in Europa gebouwd om een afzet te creëren voor zijn pyrolyseolie. De afschaffing van de MEP-regeling maakte dit plan onhaalbaar, maar wanneer de regeling voor groene stroom verandert, kan dat alsnog gebeuren.

In het laboratorium staat tegenover de proefinstallatie voor pyrolyse een zware houten kast waarin zich een andere proefopstelling bevindt. Twee man zijn er aan het werk met de vereiste veiligheidsbrillen op de neus. Ze proberen algen te vergassen. Ik frons mijn wenkbrauwen. Algen, legt Prins uit, zijn een gemakkelijke bron van biomassa. Ze hebben weinig nodig (fosfaat, CO_2 en zonlicht) en groeien enorm snel. Maar het vergassingsproces is iets speciaals. Het biomateriaal gaat in een soort super snelkookpan bij een temperatuur van maar liefst 600 graden en een druk van 300 atmosfeer. Vandaar de zware houten omkisting. Bij die omstandigheden wordt het water 'superkritisch', een toestand die tussen damp en vloeistof in zit en waarbij vrijwel alles oplost. Moleculen worden door het ziedende water uiteengereten tot de kleinst mogelijke brokjes.

Eigenlijk gebeurt hier hetzelfde als bij pyrolyse, zegt Wolter Prins. Organische moleculen vallen uiteen in kool en olie, maar dan gaat het proces nog verder door. Het ziedende water kraakt moleculen zo ver door totdat er alleen nog gassen over zijn: methaan, koolmonoxide, kooldioxide en waterstof. In theorie gaat er slurrie met algen of klein verdeeld organisch afval in, en komt er aan de andere kant van de reactor schoon water uit, waar de gassen uit omhoog borrelen. In theorie. Maar de praktijk is weerbarstig. Het onderzoek loopt al acht jaar en bevindt zich nog op fundamenteel niveau.

Een voorbeeld: de opstelling werkt met warmtewisselaars om de warmte van superkritisch water na het kraken over te brengen naar het instromende water. Daardoor verliest het superkritisch water zijn toverachtige oplossingskracht en verschijnen er opeens teer en kool in het water. Daardoor slibben de buizen snel dicht. Onderzoek moet duidelijk maken hoe dat te voorkomen. Zo weten ze nu al bij BTG dat een katalysator de hoeveelheid kool en olie in het water kan verminderen en dat toevoeging van een base helpt om geen (giftig) koolmonoxide uit het proces te krijgen, maar het neutrale kooldioxide. Er is nog veel werk nodig om superkritisch vergassen op dezelfde manier onder de knie te krijgen als pyrolyse. 'Het is een tricky proces,' vindt Prins. 'Maar wel veelbelovend.'

Brandstof uit biomassa-afval, dat is in drie woorden de missie van BTG. Pyrolyse is geschikt voor droog afval, superkritische vergassing is bedoeld voor natte derrie.

Plantaardig tanken

De tweede editie van het Congres Duurzame Mobiliteit in Leeuwarden had een merkwaardige openingsact. Een Landrover kwam naar binnen gereden met twee studenten aan boord. Het had wat weg van gemotoriseerde huisvredebreuk, ware het niet dat de twee inzittenden, Johan Roos en Sander Ansems, onofficieel wereldrecordhouder CO_2-vrij rijden zijn. Ze reden in vijf maanden tijd van Leeuwarden naar Peking op plantaardige olie. Voor het avontuur, maar ook om te laten zien dat het kon. Dat een eenvoudige ombouw voldoende is om een dieselmotor op koolzaadolie te laten lopen.

Een jaar eerder was ik ze op het congres tegengekomen. Hun opvallende Landrover Discovery met grote stickers op de deuren stond op het parkeerterrein en we raakten aan de praat. Ze vertelden over hun plan om een demonstratierit naar Peking te ondernemen onder de naam 'Own Eyes Experience'. Avontuur en ideologische bevlogenheid spatten eraf. Ze waren op dat moment halverwege hun studie en hadden besloten dat dit het moment was om zo'n rit te ondernemen.

Ze vormden een duo met contrasten: Johan Roos, de bachelor fysische geografie, is lang, heeft golvend donker haar en hij is de meest bedachtzame van de twee. Sander Ansems is klein, fanatiek skateboarder, met blond haar tot op de schouders en hij praat honderduit.

Tijdens de demonstratierit vertelt Sander dat de motor eerst warm moet lopen voordat hij kan overschakelen naar de dikkere koolzaadolie. De warmte van de motor maakt de plantaardige olie vloeibaarder, waarna die de plaats van de diesel over kan nemen. Eventueel loopt de auto ook op zonnebloemolie of olijfolie of wat er maar aan biologische olie voorhanden is.

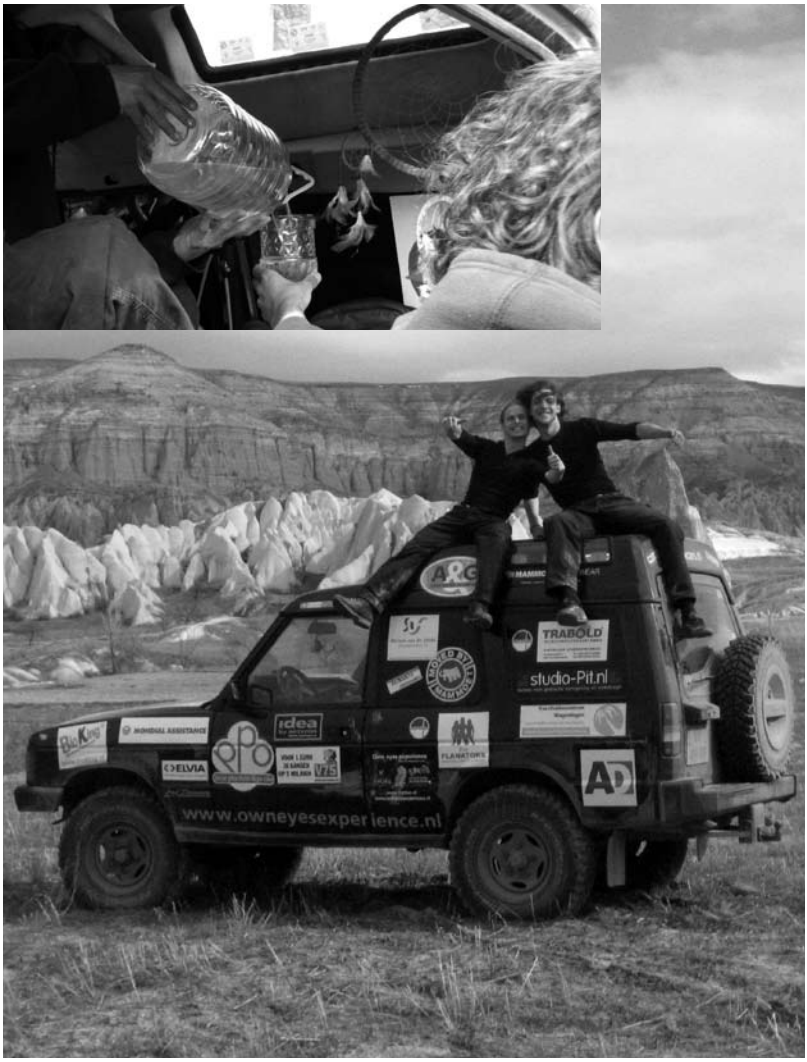

FIG.38 Zolang het maar olie is... – Foto: Johan Roos en Sander Ansems

Op 26 januari 2006 vertrekken de jonge Hagenaars uit Leeuwarden. Op hun website www.owneyesexperience.nl doen ze verslag van hun tocht.[79] De reis volgt de zijderoute en loopt via Istanbul, Teheran, Asjchabad (Turkmenistan) en Almaty (Kazachstan) naar Peking. Dat einddoel bereiken ze op 15 mei 2006 en de tripteller staat dan op 29.152,1 kilometer. Ze worden welkom geheten door ambassadeur Van den Berg

en zijn team en via een videolink nodigt staatssecretaris Pieter van Geel (VROM) hen uit de CO_2-boekhouding in Den Haag te komen overhandigen. Ze hebben 80 procent van de tocht op koolzaadolie kunnen rijden, maar niet alles. Bovendien is er de terugvlucht en de verscheping van de Landrover terug naar Nederland, die niet CO_2-vrij verlopen. Natuurlijk willen Roos en Ansems geen koolstofschulden achterlaten, zodat ze toezeggen de uitgestoten CO_2 te zullen compenseren door aanplant van naar schatting 60 bomen in Sabah, Maleisië.

CO_2-vrij rijden lijkt simpel, en zo hoort dat ook bij een demonstratieproject. Maar de werkelijkheid is, zoals altijd, een stuk ingewikkelder. Het begint al bij de keuze van de brandstof (diesel, ethanol, methanol of een andere alcohol), de motor (diesel, gemodificeerde benzinemotor of hybride) en het gewas dat de brandstof moet leveren. Tenslotte maakt de manier van productie veel uit voor de mate waarin een brandstof CO_2-vrij genoemd kan worden.

Het gebruik van biomassa als brandstof is een hoogtechnologische vorm van *back to basics*. Hout, turf en mest waren voor de ontdekking van fossiele brandstof de enige beschikbare energiebron. In Nederland was er al in de middeleeuwen een tekort aan. De naam Holland is afgeleid van 'Holtland' en verwees naar de ruime hoeveelheden hout (Holz).[80] Maar toen het hout schaars werd, zag men zich genoodzaakt zijn toevlucht te nemen tot turf. De sporen van de grootscheepse turfstekerij zijn tot op de huidige dag zichtbaar in de talrijke meren en plassen in de driehoek Amsterdam, Rotterdam en Utrecht, waarvan later een deel met windkracht is drooggemalen.

In grote gebieden van Afrika, India en Zuid-Oost Azië is hout nog steeds de belangrijkste brandstof voor de kookpotten. Vrouwen en kinderen zijn daar een groot deel van de dag bezig om voldoende hout bijeen te sprokkelen om op te kunnen koken. Zodra zich een mogelijkheid voordoet om op een andere manier aan brandstof te komen, gebeurt dat doorgaans ook. En met goede reden: jaarlijks overlijden er 1,3 miljoen mensen door inademing van rookgassen van de houtvuurtjes. Dat zijn er meer dan er jaarlijks aan malaria overlijden.[81]

Dat een hoogindustriële samenleving terugkeert naar hout als brandstof is historisch gezien opmerkelijk. Maar dat gebeurt niet zonder meer. Biomassaverbranding heeft weinig meer met houtvuurtjes van doen. Een scala aan technologieën is in ontwikkeling waarmee biobrandstof zo efficiënt mogelijk verbrand kan worden met minimale

luchtvervuiling. Maar daarnaast dreigt, net als vroeger, de ontbossing. Zolang het bos weinig economische waarde heeft, is het makkelijk het te laten staan en andere landen op te roepen datzelfde te doen. Maar in Duitsland, waar geavanceerde houtkachels wegens CO_2-neutraliteit erg in trek zijn, zijn houtpallets wel te bestellen, maar nauwelijks meer te leveren en dunnen de bossen zienderogen uit.

Warmte wordt uitgedrukt in petajoule, dat is 1 miljoen miljoen joule. In Nederland vormt de bijstook van hout in elektriciteitscentrales met 30 petaJoule per jaar het grootste deel (bijna de helft) van het biomassagebruik. Houtkacheltjes zijn goed voor een kwart daarvan (7 petajoule). Samen vormen ze net 1 procent van het totale Nederlandse energieverbruik.[82]

In de transportsector is het aandeel biobrandstof nu nog verwaarloosbaar klein, maar daar moet volgens EU-richtlijnen snel verandering in komen. Met een kleine 20 procent van het nationale energiegebruik is vervoer een energiehongerige sector met een voorkeur voor vloeibare brandstoffen. Volgens Eric van den Heuvel, manager bio-energie bij Ecofys (adviesbureau voor duurzame energie) is het aandeel van duurzame transportbrandstof in Nederland minder dan 1 procent en in Duitsland 3 procent. Wereldwijd is de situatie al niet veel beter. Bio-ethanol is met 36,5 miljard liter een kleine 3 procent van de 1236 miljard liter benzine die er jaarlijks door gaat.[83] En biodiesel lijkt alleen in Duitsland aan te slaan (6 procent van de Duitse dieselmarkt). Wereldwijd wordt er jaarlijks 1087 miljard liter diesel verstookt en 3,5 miljard liter biodiesel, dat is 0,3 procent. Zo gezien is de Europese verplichting om met ingang van 1 januari 2007 2 procent bio-ethanol bij te mengen in de benzine een kleine, maar significante stap. De verplichting geldt ook voor diesel, daar wordt plantaardige olie bijgemengd. In 2010 moet het percentage plantaardige bijmenging 5,75 procent zijn. In 2020 moet volgens Europees besluit van maart 2007 10 procent van de transportbrandstof van plantaardige oorsprong zijn.

Aardig, maar vergeleken bij Brazilië is dat peanuts. Daar kent een pompstation nog maar twee smaken: pure alcohol of met benzine aangelengde 'gasohol' (23 procent alcohol in de benzine). Al sinds 1930 rijdt men hier met wisselend enthousiasme op alcohol en sinds de oliecrisis en de stijging van de olieprijzen in de jaren 70 is rijden op alcohol overheidsbeleid. Brazilië heeft ook alles mee voor zo'n alcoholeconomie: ruimte zat en de grootste producent van suikerriet ter wereld. Suikerriet

zit barstensvol glucose en het hoeft alleen maar geperst te worden om het te winnen. De suiker vergist tot alcohol en wat er dan aan plantenvezels overblijft kan gebruikt worden om de destillatieketels te stoken, zodat een auto op alcohol in Brazilië feitelijk op omgezet zonlicht rijdt. Oudere fabrieken gebruiken nog olie om de ketels te stoken, maar nieuwere gebruiken het plantaardige afval als brandstof.

Onderzoeker Carvalho Macedo van de universiteit van Sao Paulo heeft een energiebalans opgesteld voor de suikerrietteelt.[84] Als energieverbruik voerde hij kunstmest en brandstof voor landbouwvoertuigen en de fabriek op (samen 250 duizend kiloJoule per ton suikerriet) en als energieoogst de ethanol en de elektriciteit die met de verbranding van de vezels opgewekt wordt (totaal 2 miljoen kiloJoule per ton). Suikerriet levert aan energie acht keer meer op dan het kost, concludeerde hij.

De laatste jaren is alcohol aan de pomp extra populair geworden door de introductie van zogenaamde flexfuelauto's, die inmiddels de helft van het Braziliaanse wagenpark uitmaken. Motoren met een zogenaamde flexfuelinstallatie kunnen op iedere combinatie van benzine en alcohol rijden; ze bepalen met sensoren de samenstelling van de aangeboden chemische mix en passen hun werking daarop aan. De gebruiker kan dus kiezen voor de brandstof die op dat moment het goedkoopste is. Het gevolg is een enorme groei in de productie van bio-ethanol: van 30 miljoen liter per dag in 2001 naar 45 miljoen liter per dag in 2005.[85] Anderhalf keer zoveel dus. En het ministerie van landbouw mikt voor 2010 op weer anderhalf keer meer (70 miljoen liter per dag). Helemaal zonder olie gaat het niet, maar 40 procent van de transportbrandstof is in Brazilië home-grown.

Qua hoeveelheid ethanol doet de Verenigde Staten nauwelijks voor Brazilië onder (41 miljoen liter ethanol per dag), maar energetisch ligt de situatie een stuk minder rooskleurig. Dat begint al met een ander gewas: maïs in plaats van suikerriet. Suikerriet is een makkelijk gewas dat nauwelijks water nodig heeft en na het planten vijf jaar achtereen te oogsten is. Maïs daarentegen heeft veel kunstmest, water en pesticiden nodig om te groeien en vormt relatief weinig suikers, in de vorm van zetmeel. De rest van de plant bestaat uit voor gisting onbruikbare stengels en bladeren. Het zetmeel wordt in bioraffinaderijen omgezet in suikers en vervolgens vergist tot alcohol. Maar de hoeveelheid energie die nodig is om zover te komen (kunstmest, oogst, transport, verwerking en destillatie) is ongeveer net zo groot als de energieopbrengst van de al-

cohol. Volgens critici is de netto energieopbrengst van de Amerikaanse bio-ethanol hooguit nul.

De Amerikaanse coalitie voor ethanol claimt daarentegen dat ethanol twee keer meer energie in zich draagt dan nodig is voor de productie. Hoe dan ook, ethanol uit maïs heeft een stuk slechtere energiebalans dan ethanol uit suikerriet. Waarom het dan toch geproduceerd wordt? Volgens de critici is de alcoholindustrie niet meer dan een subsidieprogramma om maïsboeren in Iowa te vriend te houden. Traditioneel is Iowa de staat die het eerst mag beslissen over wie zich kandidaat mag stellen voor het presidentschap. Geen presidentskandidaat haalt het in zijn hoofd zulke invloedrijke boeren voor het hoofd stoten. Toch dringt de kritiek op de energiemaïs door, zodat president Bush in zijn *State of the Union* in 2006 heeft laten weten dat de regering een voorstander is van cellulose in plaats van maïs als grondstof voor de ethanol. Cellulose is het hoofdbestanddeel van de stengels en bladeren van planten. Als je daar brandstof uit weet te maken, zou de energiebalans een stuk voordeliger uitpakken en dat is belangrijk voor de Amerikaanse veiligheid van energievoorziening. En voor het klimaat, had hij er aan toe kunnen voegen. Maar dat is kennelijk een mindere prioriteit voor George W. Bush.

Grasachtige grondstof voor cellulose heeft een ongekende CO_2-balans. Ecoloog David Tilman en econoom Jason Hill van de Universiteit van Minnesota publiceerden daar in *Science* een artikel over waarin ze de term 'koolstofnegatieve brandstof' introduceren: een brandstof die bij gebruik netto koolstof opslaat in plaats van uitstoot.[86]

Dat vraagt om een verklaring. Tilman en Hill hebben de opbrengst van verschillende graslanden bestudeerd. In 1994 hebben zijn ze 152 proefvelden begonnen op verarmde, verzande en verlaten gronden. Ze hebben daar grassen op gekweekt in verschillende samenstellingen (twee, vier, acht en zestien verschillende soorten op een veld) en tien jaar later hebben ze de opbrengst aan gras en de vastgelegde CO_2 in wortels en bodem in kaart gebracht. Daarbij bleek gemengd grasland op alle punten het best te scoren. Zo leverde het veld met zestien soorten 2,4 keer meer gras op dan even grote monoculturen. En ook de opslag van CO_2 in de wortels is het grootst in een gemengd veld. Ze spreken over koolstofnegatieve biobrandstof omdat er meer koolstof in de bodem wordt opgeslagen (tot 4,4 ton per hectare per jaar), dan er via verbranding uitgestoten wordt (320 kilogram per hectare per jaar). Deze cijfers worden later in het artikel genuanceerd, omdat ze voornamelijk gelden

in de eerste tien jaar na beplanting van kale bodem. Groeit er eenmaal gras, dan slaan de planten een stuk minder koolstof op in hun wortels. De onderzoekers schatten zelfs 80 procent minder.
Maar Tilman en Hill noemen nog andere voordelen van grassen als grondstof voor biobranstof: grassen nemen genoegen met stukken grond die voor landbouw ongeschikt zijn, waardoor er geen concurrentie optreedt met voedselgewassen, er is geen kunstmest voor nodig, en ze verrijken geërodeerde bodem. Tel daar ecologische factoren bij op als natuurlijke reiniging van water en bodem en een habitat voor talrijke dieren. En je begrijpt waarom beide heren aandringen op verder onderzoek van biobrandstoffen op basis van grassen.

Verder onderzoek is zeker nodig, want de gebruikte cijfers voor de energieopbrengst van de grassen zijn nog tamelijk theoretisch. In het beste geval zouden grassen omgezet in benzine of diesel 50 procent meer energie per hectare op kunnen leveren dan ethanol van maïs. Maar het omvormingsproces staat nog in de kinderschoenen en de kosten daarvan zijn nog veel te hoog voor grootschalige toepassing. Volgens ECN-onderzoeker Robin Zwart moet de olieprijs 70 tot 80 dollar per vat worden, voordat zulke technologieën economisch haalbaar worden.[87]

De verwerking van grassen tot ethanol is nog een moeizaam proces dat begint met het pletten en vermalen van het gras om enzymen toegang te geven tot de lange cellulose-ketens die ze chemisch verknippen tot suikers. De bekendste suiker uit organische pulp is xylose, een stofje dat microbiologen al twintig jaar lang tevergeefs proberen te vergisten. Maar onlangs is daar in Nederlandse laboratoria een doorbraak in bereikt.

Gist kan xylose nauwelijks omzetten in alcohol, maar het verwante suiker xylulose wel. Delfste microbiologen in het laboratorium van hoogleraar industriële microbiologie Jack Pronk (TU Delft) zochten dus naar een manier om de ene suiker in de andere om te zetten, maar slaagden daar niet in. Totdat Pronk in 2003 een artikel las van de Nijmeegse microbioloog Huub op de Camp. Die had in olifantenpoep een schimmel aangetroffen die xylose kon omzetten. De link was toen snel gemaakt en het experiment om het bewuste schimmelgen over te brengen in bakkersgist slaagde wonderwel. De gist kon toen xylose omzetten in xylulose en dat vervolgens in alcohol. De onderzoekers zijn nu bezig de snelste soorten te selecteren volgens een proces dat ze 'gestuurde evolutie' noemen. Met andere woorden: de gistcellen worden onder stress gekweekt en de sterkste overlevers worden verder opgekweekt. Die gistcel-

len moeten vervolgens robuust genoeg worden om in een grootschalig industrieel proces te worden ingezet, maar daar verwacht microbioloog Pronk geen problemen bij. Een proeffabriek voor bio-ethanol uit vezels is al gepland: Nedalco (Nederlandse Alcohol Cooperatie) bouwt er een in Sas van Gent. Pronk heeft twee octrooien aangevraagd en hij is een gelukkig man. Tegenover het blad *Bionieuws*[88] verklaart hij: 'Het is erg hot. Als we dit op symposia laten zien, spreekt iedereen ons aan. Ik zie ook dat we geluk hebben. We lopen toevallig tegen een enzym aan dat heel goed de bottleneck omzeilt, en het past precies in ons onderzoek. Dat is once in a lifetime.'

Aan de andere kant van Nederland, in Groningen, worden voorbereidingen getroffen voor een ethanolfabriek op basis van suikerbieten. Nedalco en de Suikerunie willen naast twee grote suikerfabrieken een fabriek neerzetten die jaarlijks 200 miljoen liter bio-ethanol produceert. De suikerfabrieken draaien slechts twee maanden per jaar, tijdens de bietencampagne. De alcoholfabriek zou het hele jaar door moeten draaien en kan voor een deel gebruik maken van de apparatuur van de suikerfabrieken. Voor de boeren in de omgeving zou het een uitkomst zijn. Europa wil de suikerproductie met 1 tot 2 procent verminderen, maar voor de ethanolfabriek is juist een uitbreiding van de bietenteelt nodig van ongeveer 25.000 hectare naar 110.000 hectare. De Europese richtlijn voor 5,75 procent ethanol in de benzine in 2010 biedt de boeren een aanlokkelijk perspectief. Helemaal CO2-vrij is de bietenethanol niet, maar het zou 40 procent minder CO_2 in de lucht brengen dan fossiele brandstof.

Toch lijkt ook ethanol geen ideale transportbrandstof omdat het tot ernstiger smog zou kunnen leiden. Mark Jacobson van de Stanford Universiteit heeft doorgerekend wat de luchtvervuiling zou zijn in 2020 wanneer alle auto's op 80 procent ethanol zouden rijden. Bij verbranding van ethanol komen ondermeer formaldehyde en aceetaldehyde vrij, die onder invloed van zonlicht ozon kunnen vormen: een belangrijk bestanddeel van de benauwdmakende zomersmog. Volgens de berekeningen van Jacobson zouden de verkeersdampen jaarlijks 185 meer slachtoffers eisen dan met benzine het geval zou zijn. Dat verschil is overigens niet groot op het huidige getal van 10.000 hypothetische slachtoffers per jaar in de VS van luchtvervuiling door het verkeer.[89]

Het scala aan energiegewassen is groot en groeiende, en ieder heeft zijn specifieke opbrengst, CO_2-reductie en bijzonderheden. Onderstaand een overzicht.[90]

GEWAS	BRANDSTOF	OPBRENGST/JAAR	CO_2 REDUCTIE	BIJZONDERHEDEN
Palmolie	Biodiesel	5500 liter/ha	niet bekend	Plantages i.p.v. regenwoud
Suikerriet	Ethanol	6000 liter/ha	90 %	Restverbranding levert stroom
Maïs	Ethanol	3500 liter/ha	10 - 20 %	Intensieve landbouw
Miscanthus *(Olifantgras)*	Biofuel	7300 liter/ha	65 - 70 %	Liefst in mix
Prairiegras	Biofuel	3100 - 7600 liter/ha	65 - 70 %	Liefst in mix
Populier	Biofuel	4000 - 6000 liter/ha	100 %	
Suikerbiet	Ethanol	6500 - 8000 liter/ha	40 %	
Koolzaad	Biodiesel of PPO	1500 liter/ha	70 %	
Jatropha	PPO	1500 liter/ha	niet bekend	Op onbruikbare gronden in tropen

TAB.03 Eigenschappen verschillende energiegewassen.
Getallen uit Nature (7 dec 2007, Biofuel Special),
Trouw (suikerbieten, 22 nov 2006) en Senter-Novem (koolzaad en jatropha)

Moleculen rijgen

Tegenover de natte vergistingsmethode gevolgd door destillatie is er nog een manier om biobrandstoffen te maken: de droge en hete methode van de vergassing. Daarbij verhit men de biomassa -houtsnippers, vezels of stengels, tot 800 tot 1000 graden met een kleine hoeveelheid zuurstof. Daardoor ontstaat een mengsel van brandbare gassen waaronder waterstof (H_2), methaan (CH_4) en koolmonoxide (CO). ECN gebruikt deze methode bij de proeffabricage van groen gas. De vergassing stamt uit de negentiende eeuw toen er op die manier stadsgas uit kolen werd gemaakt. Men sprak ook wel over 'droge destillatie'. In Nederland zijn er 260 gasfabrieken in bedrijf geweest, waarvan de laatste in 1970 sloot. Doordat de assen en andere reststoffen meestal op het terrein werden bewaard, zijn gasfabriekterreinen vaak ernstig verontreinigd. De opkomst van aardgas maakte de gasfabrieken overbodig, zodat de vergassingstechniek uit de gratie raakte.

Maar de vraag naar duurzame energie en de verwerking van biomassa tot bruikbare brandstof heeft daar verandering in gebracht. De vergassing is weer terug, maar nu in een hightechomgeving waarin geprobeerd wordt het proces nauwkeurig te sturen, maximaal rendement te behalen en de vervuiling tot een minimum te beperken. Het rendement van biomassavergassing, de verhouding tussen de energie-inhoud van de gassen en die van de biomassa, ligt volgens ECN tussen de 75 en 80 procent.

Transportbrandstoffen zijn bij voorkeur vloeibaar, dus moeten de gassen omgezet worden in vloeibare vorm. En dat kan, hoewel het een duur proces is, met een procédé dat in de geschiedenis alleen gebruikt werd wanneer er geen alternatief voorhanden was. In de Tweede Wereldoorlog, toen Nazi-Duitsland afgesneden was van fossiele brandstof, maakten de Duitsers op grote schaal diesel en kerosine uit kolengas. De topproductie in 1944 bedroeg 124.000 vaten per dag (14 miljoen liter) vanuit 25 fabrieken. Zuid-Afrika nam zijn toevlucht tot hetzelfde proces toen het land door de boycot tegen apartheid geen toegang meer had tot aardolie. Dankzij de investeringen die er toen zijn gedaan, voorziet de

Zuid-Afrikaanse firma Sasol nog steeds in 30 procent van de transportbrandstoffen, en het merendeel van de diesel, op basis van 'vloeibare steenkool'.

Het proces om gasvormige brandstoffen vloeibaar te maken werd in 1932 ontwikkeld door de Duitse chemici Franz Fischer en Hans Tropsch aan het Kaiser Wilhem Instituut voor Steenkoolonderzoek. Ze ontwikkelden een katalytische chemische reactie, waarbij koolmonoxide en waterstof aaneen werden geregen tot koolwaterstoffen van verschillende lengten. In formulevorm:

$$(2n+1)H_2 + n\ CO \rightarrow C_nH_{2n+2} + n\ H_2O$$

Het proces rijgt de gasmoleculen aaneen tot lange moleculen, maar de knowhow zit in de katalysator. Welke stof in welke structuur zet de gassen het snelst en met het hoogst mogelijke rendement om in lange koolwaterstoffen?

Daar is in de Shell-laboratoria in Amsterdam-Noord onderzoek naar gedaan. In 2000 werkt Martijn van Hardeveld daar aan katalyseonderzoek. In een apart gebouwtje midden op het Shell-terrein is een proeffabriek ingericht. Centraal in de hal staat een geïsoleerde kolom van een halve meter dik en daar omheen allerlei pijpen en meetapparatuur.

We lopen de trappen op naar de bovenste verdieping. Door de roostervloeren kun je helemaal naar beneden kijken. Boven aangekomen vertelt Van Hardeveld dat de reactor uit één lange buis bestaat die net gevuld is met een nieuw type katalysator. Het gas komt er van boven in en wordt in de reactor omgezet in koolwaterstofketens. Van Hardeveld: 'Bij dat proces worden er ketens van verschillende lengtes gevormd. Sommige van die ketens zijn wel honderd CH_2-groepen lang. Op die manier wordt er een wasachtig materiaal gevormd en dat is eigenlijk een soort kaarsvet.'

Om dat te zien lopen we de metalen trappen af naar de begane grond en komen aan de onderkant van de reactiekolom uit. Nu moeten we een plastic brilletje op voor de bescherming en een beetje afstand nemen als Van Hardeveld een kraantje opent. Met een boel gesis en gesputter spuit dunne kleurloze vloeistof in een opvangemmer. Het is een mengsel van vloeibaar kaarsvet en heet water. Martijn pakt er een ander vat bij en wrikt de deksel los met een schroevendraaier. 'Kijk,' zegt hij, 'zo ziet het eruit als het afgekoeld is. Een kleurloze en reukloze was of paraffine. Het spul is zo schoon dat het gebruikt kan worden om de bin-

nenkanten van melkpakken mee te coaten.' Dat is een voordeel van het dure Fischer-Tropsch-proces: het eindproduct is schoon. Geen zwavel en nauwelijks aromatische koolwaterstoffen als benzeen en tolueen. Wel verbaast het me dat het eindproduct vaste was is. Maar Van Hardeveld legt uit dat de was via een kraker weer omgezet kan worden in de gewenste vloeibare brandstof: diesel of benzine.

FIG.39 Moderne Fischer-Tropsch-fabriek in Bintulu, Maleisië. – Foto: Shell

Shell gebruikt het Fischer-Tropsch-proces op grote schaal in Bintulu, Maleisië om aardgas om te zetten in zwavelarme dieselolie en was die geschikt is voor de voedingsindustrie. Een grotere toepassing is de fabriek die Shell bouwt in Katar, een klein schiereiland in de Arabische Golf met een gasvoorraad die volgens Shell na Rusland en Iran de grootste ter wereld is. Vloeibare brandstoffen zijn makkelijker en goedkoper te exporteren dan aardgas, dus zet Shell het aardgas op grote schaal om in vloeibare vorm, volgens een uitgekiend Fischer-Tropsch-proces. Shell hoopt de GTL-fabriek ('gas-to-liquid') in 2010 klaar te hebben. Dan zal dagelijks 45 miljoen kubieke meter aardgas omgezet worden in 140.000 vaten brandstof.

Het momenteel grootste Fischer-Tropsch-project op basis van biomassa is een samenwerking van Shell en het Duitse bedrijf Choren dat in Freiburg een biodieselfabriek willen bouwen. De bouw zou in 2008 moeten beginnen. De installatie zou jaarlijks 200.000 ton hout en landbouwafval om moeten zetten in 150.000 ton biodiesel ('SunDiesel') of 110.000 vaten. Dat is met afstand de grootste installatie voor biodiesel, maar de productie is in verhouding gering: 4 procent van de geschatte Duitse dieselmarkt in 2015.

Fischer-Tropsch is hot. Naast Shell, hebben ook Exxon en Chevron stevig in de techniek geïnvesteerd, evenals het grootste Amerikaanse steenkoolbedrijf Peabody Coal. In de Verenigde Staten is er een groeiende lobby om Fischer-Tropsch-installaties te bouwen voor de verwerking van steenkool. De staat Montana bijvoorbeeld heeft voldoende steenkool om 240 miljard vaten diesel uit te produceren, wat ongeveer even veel is als de bewezen reserves van Saoedi-Arabië.

In tijden van nervositeit over leveringszekerheid, lijken 'vloeibare kolen' een aantrekkelijk alternatief. Brian Schweitzer, ranche-eigenaar en democratisch gouverneur uit Montana is een uitgesproken voorstander van de kolendiesel. Milieubezwaren ('To a lot of people, coal is a four-letter word') tegen de CO_2-uitstoot probeert hij te ontkrachten door te wijzen op de mogelijkheid van CO_2-afvang tijdens de productie. 'Het kwam uit de grond, we sturen het gewoon weer naar huis,' vertelt hij tegen een verslaggever van *Nature*.[91] Maar zo eenvoudig is het niet. Volgens onderzoek van het National Renewable Energy Laboratory komt bij productie en gebruik van diesel uit kolen bijna twee keer meer CO_2 vrij dan bij diesel uit aardolie. De Amerikaanse milieugroepering National Resources Defense Council (NRDC) komt met een vergelijkbaar geluid: zelfs als 90 procent van de CO_2 bij de productie wordt afgevangen en opgeslagen, dan nog is de CO_2-uitstoot bij het gebruik van kolendiesel 8 procent meer dan bij gewone diesel.

De gebruikte techniek – Fischer-Tropsch – zegt dus weinig over het milieueffect of de CO_2-reductie. FT-omzetting van hout, gras en vezels in biodiesel lijkt een veelbelovende techniek, die de hoeveelheid uitgestoten CO_2 met 75 tot meer dan 100 procent (dankzij CO_2-opslag in de grond door grassen) kan beperken. Maar de fabricage van kolendiesel uit steenkool via hetzelfde Fischer-Tropsch-proces leidt juist tot 10 tot 100 procent méér CO_2-uitstoot, vergeleken met diesel uit aardolie.

Analisten schatten dat kolendiesel economisch rendabel is bij een olieprijs van 50 tot 55 dollar per vat. Bij de huidige olieprijs van 60 dollar per vat is dat dus het geval. Lastiger ligt het voor biodiesel via het Fischer-Tropsch-procédé. ECN-onderzoeker Robin Zwart schat dat de olieprijzen boven 70 tot 80 dollar per vat moeten komen voordat de productiekosten van biodiesel concurrerend gaan worden. Daarbij dient wel gezegd dat productiekosten een klein deel zijn van de prijs aan de pomp. Belasting, heffingen en accijnzen bepalen uiteindelijk voor een groot deel wat de brandstof kost. Een koolstofheffing, accijnsvrijstelling of doorberekende emissierechten kunnen duurzame brandstof een

prijsvoordeel geven ten opzichte van (extra) vervuilende kolendiesel. Met andere woorden, de prijs van brandstof is net zo goed een kwestie van productiekosten als van overheidsbeleid.

Een andere kwestie is de beschikbaarheid van biobrandstof, aangenomen dat het voordelig genoeg is. Wat komt erbij kijken om, zeg, 10 procent van de transportbrandstof uit duurzame bronnen te halen? Het blad *New Scientist* maakte in 2006 een overzichtje van het percentage landbouwgrond die een land zou moeten reserveren om in 10 procent van de eigen biobrandstof te voorzien:

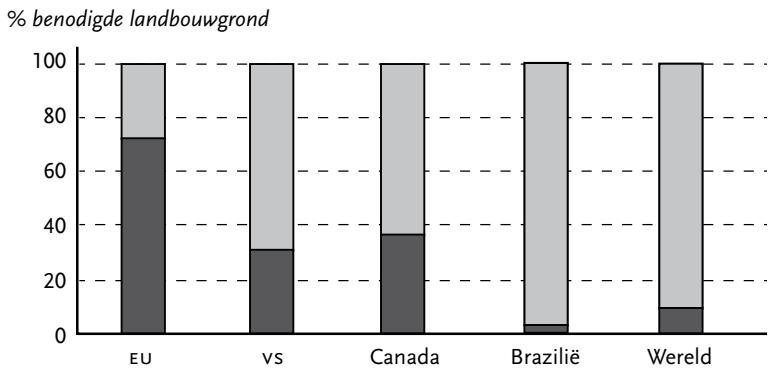

FIG.40 Percentages benodigde landbouwgrond voor teelt 10% van eigen transportbrandstof. Bron: New Scientist

Driekwart van de Europese landbouwgrond voor brandstoffen? En de ambities reiken een stuk verder dan 10 procent. Het Platform Groene Grondstoffen, een samenwerkingsverband tussen overheid, bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties, wil in 2030 een derde van de fossiele brandstoffen vervangen door biomassa. Dan zou 25 procent van de elektriciteit, 17 procent van de warmte en maar liefst 60 procent van de transportbrandstoffen uit biologische bron moeten komen.[92] Dat lijkt een zeer ambitieuze doelstelling, want het Internationaal Energie Agentschap IEA houdt het voor Europa onder het milieubewuste 'alternatieve energiescenario' op 12 procent biobrandstof in 2030 voor de vervoersector.[93]

Tel daarbij op dat het Rijks Planbureau RPB tot 2020 voor Nederland een forse groei van het aantal auto's voorziet: 20 procent meer personenwagens en 40 to 80 procent meer vrachtauto's. Dat betekent een enorme honger naar biobrandstof, waarin Nederland en veel andere

Europese landen zelf niet in kunnen voorzien. Ze zullen dus aangewezen zijn op import van biobrandstof. Hoogleraar energietechnologie Kees Daey Ouwens (TU Eindhoven) ziet die bui al een tijdje hangen en hij pleit voor een samenvoeging van energiepolitiek en ontwikkelingspolitiek.[94] De éminence grise van de duurzame energie vestigt graag de aandacht op de jatrophaplant. Dat is een struikachtige plant die in Afrika groeit op voor landbouwgewassen ongeschikte en zelfs op verzilte grond. De struik is bijvoorbeeld in het droge Mali in gebruik als afscheidingsheg. De noten van de plant zijn giftig en worden dus niet door de geiten opgevreten. Per hectare kan jaarlijks 5 ton noten geoogst worden met een olie-inhoud van 30 procent. De olie is door persing te winnen. Het materiaal dat achterblijft kan vergist worden (biogas) en het residu is als meststof bruikbaar. Kees Daey Ouwens zou graag zien dat ontwikkelingslanden een kans krijgen zich te ontwikkelen als olieexporteur. Een grote Fischer-Tropsch-fabriek op de Maasvlakte zou het binnenkomende materiaal om kunnen zetten in de gewenste soort van biobrandstof.

Het juiste moment is daar nog niet voor gekomen, zegt Erik van den Heuvel, manager bio-energie bij Ecofys. Op gebied van vergassing, vergisting en warmtekrachtkoppeling gebeurt er veel, maar de bioraffinage bevindt zich nog teveel in de sfeer van pilotstudies en demonstratieprojecten, vindt hij. Raffinage is complex en het is economisch nog niet haalbaar. Toch wordt er al jaren gesproken over een bioraffinaderij op de Maasvlakte en eens zal het er wel van komen. In januari 2007 verscheen het rapport 'Bioport: Nederland als mainport voor biomassa' waarin het InnovatieNetwerk pleit voor 'een broedplaats op de Nieuwe Maasvlakte waar ondernemers nieuwe toepassingen voor biomassa bedenken. Deze zogenaamde Bio-Botlek moet een wereldwijd knooppunt worden.'[95]

Van den Heuvel schat in dat Europa voor 30 procent in de eigen behoefte van biobrandstof kan voorzien. Hij ziet de beste mogelijkheden in wat hij noemt de tweedegeneratiebiobrandstoffen die van meer houtachtig materiaal gemaakt zijn en een betere CO_2-reductie hebben dan de huidige bio-ethanol. Daar wordt volgens hem nu hard aan gewerkt en, meldt hij enthousiast: 'Biobrandstof staat voor een doorbraak.'

Aangenomen dat dat zo is, dan blijft de vervanging van fossiele brandstof een formidabele opgave waarvoor nog decennia aan onderzoek en ontwikkeling nodig zullen zijn. Het is namelijk een lange weg van laboratoriumschaal via proeffabriekjes en demonstratieprojecten

naar industriële en commercieel haalbare toepassing. Een lange weg met talloze hobbels, omleidingen en valkuilen.

Daarnaast is het verre van duidelijk waar geschikte grondstoffen vandaan moeten komen. De ideeën van Kees Daey Ouwens om tropische landen in te schakelen zijn origineel en veelbelovend, maar ook nog erg schetsmatig. Wederzijds belang, voorkomen van concurrentie met voedselgewassen en bescherming van de natuurlijke begroeiing zijn noodzakelijke randvoorwaarden. Daar komt nog heel wat landbouwkundig onderzoek bij kijken, alsmede regelgeving, certificeringstelsels en handelsverdragen.

Leven van de wind

FIG.41 Foto Shell

'In 2007 komt 3,3 procent van de Europese stroom van windenergie.

Dit kan in 2030 bijna een kwart worden.'

European Wind Energy Association EWEA

Windpark op zee

'Petje gaat af,' voorspelt schipper Arno Post grijnzend als ik aan boord stap van de Windrib. Het is een open rubberboot met harde bodem (*Rigid Inflatable Boat*) van negen meter lang met een driehonderd pk diesel onder de laadvloer. In het midden een stuurconsole met voor en achter kleine zitjes met roestvrijstalen beugels om je goed vast te houden. De schipper is breed en gedrongen, met een gebruinde kop en stekeltjeshaar. Een ex-marinier met veel zeemijlen. 'Het is rustig weer, weinig golven, dus haalt de boot vandaag 75 tot 80 kilometer per uur over het water,' vertelt hij. Daar is mijn zeilpetje inderdaad niet tegen bestand. De rest van de uitrusting gelukkig wel. Van projectmanager Huub den Rooijen (Shell) heb ik een zeiloverall aan gekregen tegen het spatwater en dat zal een verstandige maatregel blijken.

Ik wil een kijkje nemen op het Noordzee windpark dat 10 tot 18 kilometer voor de kust van Egmond ligt. Op initiatief van de Nederlandse overheid is daar in de zomer van 2006 een proefpark verrezen met 36 windmolens. Noordzeewind, een consortium van Shell en Nuon, heeft het park aangelegd met Deense windmolens. 'Proven technology' heet dat. Het park is op 18 april 2007 door Prins Willem-Alexander geopend.

Ten tijde van mijn bezoek, wordt er de laatste hand aan gelegd. Als iedereen een plekje heeft gevonden geeft de schipper gas en begeeft de Windrib zich grommend naar de havenmond. Eenmaal buitengaats gaat de gashendel naar voren. De boot komt dan bijna los van het water en stuift met een adembenemende vaart over een kabbelend zeetje noordwaarts.

Het verhaal van windenergie in Nederland is er één van stroperigheid, tegenwerking en gemiste kansen. De publicatie van het Rapport van de Club van Rome in 1972 en de energiecrisis een jaar later waren voor de regering Den Uyl aanleiding om een aanzet te geven tot energiebesparing en de ontwikkeling van alternatieve energiebronnen. Windenergie kwam daardoor hoog op de agenda te staan. Onder het Nationaal Onderzoeksprogramma Windenergie (NOW) werd er vanaf

1976 onderzoek gedaan naar windturbines door onder meer het nationale lucht- en ruimtevaart laboratorium (NLR) en aan de technische universiteiten. Parallel hieraan werd er praktisch geëxperimenteerd door idealistische studenten en door vrienden van De Kleine Aarde.

Ik kan me de activiteit aan de rand van de campus van de Technische Hogeschool Twente (nu: Universiteit Twente) goed herinneren. Bebaarde studenten waren er steevast aan het bouwen met stellages van windmolens voor elektriciteitsopwekking en waterwinning. De Werkgroep Ontwikkelingstechniek (WOT) deed dat vooral met het oog op installaties in ontwikkelingslanden. Werktuigbouwers voor Afrika. Bedrijven die windmolens bouwden deden dat meestal voor op het boerenerf. De meest bekende van die kleine zelfbouwers was de firma Lagerweij uit Barneveld die met de Klaver-10 (blauwe stalen kast met houten wieken van tien meter diameter) vrij succesvol was. Maar de tegenwerking begon te groeien. Elektriciteitsbedrijven lieten weten dat ze er niets voor voelden dat overal maar windmolens verrezen met diverse kwaliteiten en standaarden. Dat zou het elektriciteitsnet teveel ontregelen. Ze eisten de regie op over de windmolens om wildgroei te voorkomen. Het gevolg was dat na een korte opbloei in de tweede helft van de zeventiger jaren, het aantal windmolens in Nederland vanaf begin jaren tachtig vrijwel stagneerde. De elektriciteitsbedrijven voelden er in feite niets voor. Ze vonden de molens te duur en te onbetrouwbaar.

Eind 1985 was de totale capaciteit in Nederland op 9 megawatt blijven hangen, terwijl er in Denemarken al 60 megawatt stond. Pas in 1989 begon de stemming te veranderen door een bewustwording van het versterkte broeikaseffect. Het nationaal milieubeleidsplan verscheen en er kwam een nieuwe elektriciteitswet die het mogelijk maakte dat elektriciteitsbedrijven een heffing op de levering van energie in rekening mochten brengen. Die extra inkomsten, samen met het groeiende besef van het belang van een groen imago, bracht een kentering in de houding van de energiebedrijven teweeg. Helaas was het overheidsbeleid ten aanzien van windenergie weinig consistent. In 2003 kondigde Den Haag een stop af op de vergunningverlening voor windparken op zee. Een jaar later zei minister Brinkhorst de parken weer wel te willen subsidiëren waarop de subsidies opeens tóch weer werden stopgezet, wegens teveel belangstelling. ‘Subsidie aan, subsidie uit, vergunning wél, vergunning niet’, vat hoogleraar windenergie Van Kuik van de TU-Delft samen. ‘Het signaal is verkeerd. Het straalt hulpeloosheid uit. Terwijl

een consistent beleid juist het allerbelangrijkste is,' verklaart hij in het universiteitsblad *Delta*.[96]

Voor de Nederlandse windmolenindustrie is het zwabberende overheidsbeleid funest gebleken. Van de Nederlandse windmolenbouwers (naast Lagerweij ook Windmaster en Nedwind) is er niet één meer overgebleven. De molens in de Noordzee zijn nu van Deense makelij.

Geen enkele Nederlandse windmolenbouwer? Jawel, toch. In 2005 is in Den Helder een nieuwe turbinebouwer begonnen: DarwinD. Gesteund door deelname van Ecoventures, onderdeel van Econcern uit Utrecht, bouwt Darwind in 2007 de eerste vier 3 megawatt turbines, om later door te groeien naar 5 tot 6 megawatt.

FIG.42 De eerste windmolens op de Nederlandse Noordzee. – Foto: Shell

Uit de mist doemt in de verte de eerste windmolen op. Pas als de boot nadert, valt het enorme formaat op. De eerste vijftien meter boven het water zijn knalgeel geverfd. Naast de hoofdmast lopen buizen omhoog en een trappetje met forse handrails. Dat is om monteurs naar boven te laten klimmen. Ze stappen dan vanaf de boeg op het hoogtepunt van een golf op de ladder en gaan dan in de molen aan het werk. Boven windkracht vier zijn de golven daarvoor te hoog en ligt het onderhoud stil, want veiligheid gaat boven alles, benadrukt Den Rooijen. Hij vertelt dat verderop duikers bezig zijn om met polsdikke elektriciteitskabels de molens onderling te verbinden.

Boven het gele platform is de mast grijs als de Noordzee. De mast reikt tot 70 meter hoogte. De rotor heeft drie bladen en een diameter van 90 meter. Er staat weinig wind, maar evengoed zijn de enorme bladen goed te horen als ze langskomen. Zwiep, zwiep, zwiep. De Vestas V90 heeft een vermogen van 3 megawatt en er staan er hier 36 van, opgesteld in vier rijen in noordwestelijke richting. Kosten: 200 miljoen euro voor een opgesteld vermogen van 108 megawatt. Omdat het niet altijd even hard waait, moet je gemiddeld rekenen met 30 tot 40 procent van het totaal vermogen. Het park kan dus uiteindelijk met zo'n 40 megawatt gemiddeld vermogen honderdduizend huishoudens van stroom voorzien.

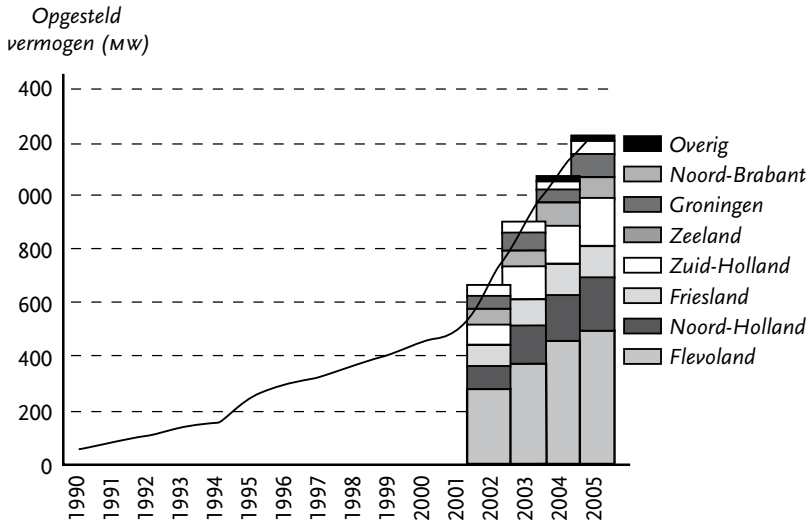

FIG.43 Windenergie in Nederland groeit vanaf 1990 exponentieel. – Bron: ECN

Het gaat nu hard met windenergie. In 1990 stond er nog maar 50 megawatt opgesteld, maar in de jaren erna steeg dat gestaag naar 450 megawatt in 2000 en tot 1200 megawatt in 2005. Eind 2006 voegt het Noordzeewindpark daar 108 megawatt aan toe en in 2008 komt er voor Egmond nog een groter offshore windpark bij onder de naam Q7. In 2010 zou er volgens de richtlijnen van het ministerie van economische zaken 1500 megawatt moeten staan en in 2020 nog vier maal zoveel, alleen al offshore.

Toch is het goed die cijfers te relativeren. De doelstelling van 6000 megawatt op zee gold oorspronkelijk voor 2010, maar werd tien jaar opgeschort. Nu is de stijging dan spectaculair, maar het aandeel in de totale energieproductie blijft gering. Bij een opgesteld vermogen van 1500 megawatt (omstreeks 2006-2007) is het gemiddelde geleverde vermogen ongeveer een kwart daarvan: 400 megawatt. In verhouding tot de gemiddelde Nederlandse elektriciteitsvraag van 12.000 megawatt is dat slechts 3 procent.

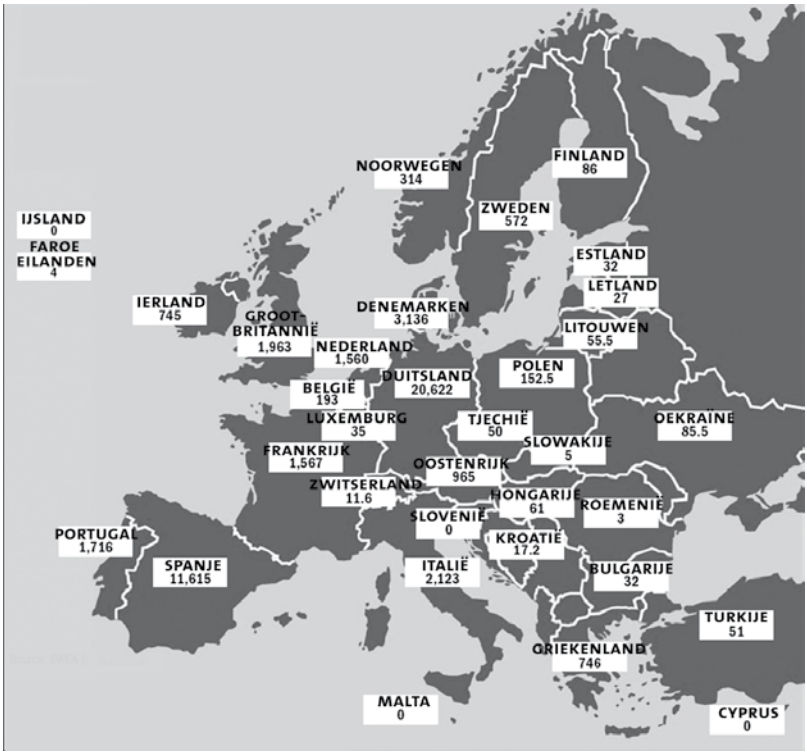

FIG.44 Opgesteld vermogen aan windenergie in Europa eind 2006. – Bron: EWEA

In Denemarken is het aandeel windenergie 20 procent. Dat geeft bijzondere problemen omdat de wind notoir wisselvallig is. De Denen hebben een elektriciteitskabel naar Noorwegen getrokken om de onbalans in het net op te vangen. Wanneer er veel wind is, gaat de extra energie naar Noorwegen, waar ze de waterkrachtcentrales dan dicht draaien.

Omgekeerd leveren de Noren stroom aan Denemarken op windstille dagen. Ingenieurs verzinnen allerlei manieren om met het wisselende karakter van de windenergie om te gaan. Men denkt aan buffers met lucht onder hoge druk in luchtdichte aardlagen. Anderen zien veel heil in een open Europees stroomnet waarin energieproducenten hun productie op elkaar kunnen afstemmen zodat overschot en tekort elkaar in balans kunnen houden. Volgens de huidige inzichten is 20 procent windenergie zo ongeveer wel het maximum aandeel van windenergie in een elektriciteitsnet. Daarboven wordt het risico op overbelasting en uitval te groot. Zeker als de wind geleidelijk aan boven windkracht 8 komt. Dan schakelen de molens namelijk automatisch af. Van vol vermogen naar nul. In het voorjaar van 2006 gebeurde dat in Noord-Duitsland, waar 2500 megawatt aan windturbines staat opgesteld. Toen dat vermogen in een kwartier tijd wegviel, konden de gewone centrales het niet meer bolwerken. Men moest toen met man en macht proberen om elders stroom vandaan te halen om uitval te voorkomen.

In de nacht van 18 op 19 januari 2007 vond er in Duitsland een ander incident plaats. Er trok een zware storm over Europa en men rekende erop dat de windparken in de Noordzee en Oostzee gedeeltelijk zouden uitschakelen. Maar terwijl de storm in de nacht aantrok en de bevolking het licht uitdeed, werd de stroommarkt overstelpt door het volle vermogen van de windparken. De netbeheerders probeerden overbelasting van het net te voorkomen door de stroom verderop door Europa te verspreiden. Tot in Zuid-Frankrijk aan toe. Maar het aanbod bleef veel groter dan de vraag, waardoor de stroommarkt uiteindelijk crashte. Voor het eerst in de geschiedenis van de beurs werd een stroomprijs van 0 euro geboekt.

Behoedzaam pakt een kraan achterop het schip Ostea blokken steen ter grootte van een skippybal uit het ruim. Dan beweegt de grijper naar de voet van de windturbine, breekt de waterspiegel en deponeert zijn lading in de diepte. Stenen storten is precisiewerk geworden dat GPS-gestuurd verloopt en met sonarbeelden gecontroleerd wordt. Rondom elke mast is onderwater een zandheuveltje gebouwd. De keien moeten ervoor zorgen dat het zand niet meegezogen wordt door de stroming. Het zijn de afrondende werkzaamheden hier in het windmolenpark Noordzeewind.

Op mijn vraag hoe groot de windenergie op de Noordzee uiteindelijk gaat worden, reageert Huub den Rooijen behoedzaam. Er zijn veel andere belangen mee gemoeid, blijkt al snel. Het gebied tussen de wind-

molens is voor alle scheepsverkeer gesloten. Je kunt dus niet onbeperkt uitbreiden zonder rekening te houden met visserij, transport en zandwinning. Maar als alles naar wens loopt kan het park worden uitgebreid tot 'vele duizenden megawatts.' De getallen die circuleren spreken van 4.000 tot 6.000 megawatt offshore. Voor het beeld: een park van 26 bij 26 kilometer, 23 kilometer uit de kust van Den Helder. Uiteindelijk is de doelstelling om ook in Nederland 20 procent van de stroom uit windenergie te betrekken. Met een offshorepark van 6.000 megawatt heb je daar al 80 procent van gerealiseerd. Of, zoals Huub den Rooijen het zegt: 'Dan kun je alle zes miljoen huishoudens in Nederland met windenergie van stroom voorzien.' Nou ja, bijna dan. Huishoudens gebruiken ongeveer een kwart van de totale elektriciteit in Nederland, iets meer dus dan de beoogde 20 procent windenergie.

FIG.45 Huub den Rooijen (l) tijdens interview met Jos Wassink. - Foto: Petra Wijnsema

Overigens kan zo'n windpark op zee nog aardige neveneffecten hebben. Doordat het gebied gesloten is voor de visserij, zouden windmolenparken oases kunnen worden binnen de overbeviste Noordzee. Er zouden kraamkamers kunnen ontstaan van waaruit de visstand zich weer een beetje kan herstellen. Het visserijonderzoeksinstituut IMARES voert in ieder geval tellingen uit in het Noordzeewindpark om de invloed van het park op het zeeleven in kaart te brengen.

Toen de eerste plannen naar buiten kwamen voor een windmolenpark buiten de kust, waren de protesten niet gering. De windmolens zouden het laatste vrije uitzicht aan de kust bederven. Daar hoor je opvallend weinig meer van, en in IJmuiden al helemaal niet. Schipper Arno Post weet hoe dat komt: Noordzeewind is een forse werkgever voor scheepvaart, constructiebedrijven en dergelijke. En het uitzicht? 'Ach, of je nou naar niets kijkt, of je kijkt naar iets,' vindt Post. 'Dan zie ik liever wat molens draaien.'

Laddermolen

'Duurzaam moet leuk, gek en spannend worden gemaakt. Want wie dat aan de jeugd verkoopt, heeft de toekomst,' aldus ex-astronaut en hoogleraar duurzame energie en transport Wubbo Ockels. Regelmatig komt Ockels als Delftse professor in het nieuws met de succesvolle zonnewagen Nuna of met zijn futuristische superbus. En nu dus met de zogenaamde laddermolen of *Ockels-mill*. Bij dit idee is letterlijk de *sky the limit*.

Ockels is dol op vliegen en ook op vliegeren. Zo ervoer hij dat een vlieger van nature omhoog trekt en een vliegtuig het makkelijkst daalt. In de laddermolen die hij bedacht combineert hij beide eigenschappen in een unieke benadering van windenergie. Ga uit van een stevig grondstation dat verankerd zit in de bodem. Aan een lier zit een extreem sterke en lichte kabel bevestigd waaraan met enige tussenruimte bestuurbare vliegers opgelaten worden. Qua vorm zitten ze tussen vlieger en vliegtuigvorm in. Ockels noemt het *kiteplanes* en denkt aan uitvoering als een opblaasbaar vleugelprofiel, een *aerofoil*. Het idee is dat de vliegers de kabel mee omhoog trekken tot een hoogte van tien kilometer. Op het hoogste punt verandert er iets aan de stand van de vlieger, waardoor die kalm als een zweefvliegtuig naar beneden komt. Zo ontstaat een tien kilometer hoge lus vol *kiteplanes* die in een eindeloze trage cyclus stijgen en dalen. De trekkracht van de kabel aan de lier van het grondstation is volgens de berekeningen zo groot dat een gekoppelde generator 100 megawatt aan elektriciteit op zou kunnen wekken. Dat staat gelijk aan dertig forse windturbines, waarbij de laddermolen het voordeel zou hebben dat op grote hoogte de wind sterker is en vrijwel nooit wegvalt.

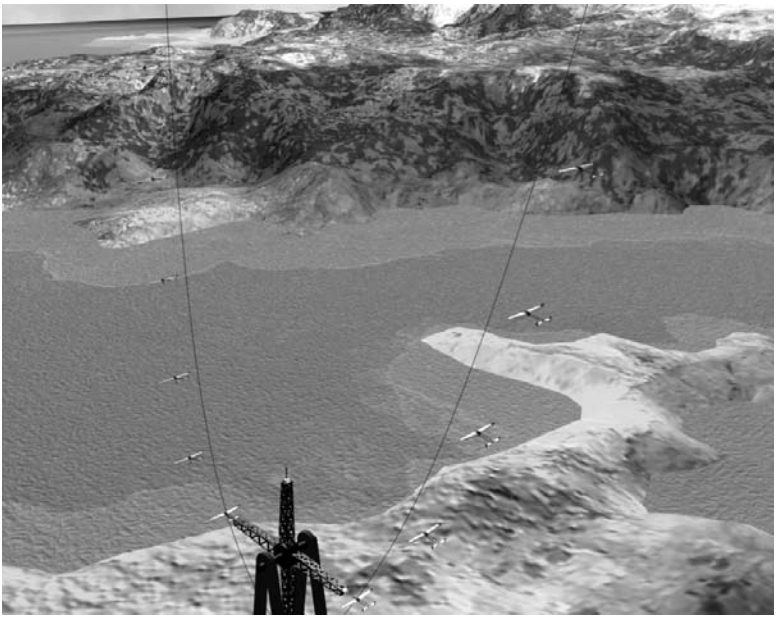

FIG.46 Artist Impression van de laddermolen. - Ir. J. Breukes, TU Delft

Een typisch Ockels idee: gewaagd, futuristisch en tot de verbeelding sprekend. 'Nederlanders zijn teveel geneigd de beperkingen te zien,' vindt de Delftse hoogleraar. 'Dat werkt verlammend. Je kunt ook gewoon kiezen voor een goed idee.' Inmiddels is een patent aangevraagd en werken studenten en promovendi aan het grondstation en de bestuurbare vliegers.

In maart 2007 kreeg Ockels een miljoen euro van de gemeente Rotterdam om een demonstratiemodel van zijn laddermolen te bouwen. Twee jaar werken TU-onderzoekers op het zogenaamde innovatielab op het Rotterdamse RDM-terrein aan een prototype van de laddermolen dat bedoeld is om een schip mee aan te drijven. Uiteindelijk denkt Ockels er zelfs mammoettankers mee aan te kunnen drijven. 'Dan moet de spanwijdte van de vliegers misschien honderd meter bedragen,' verklaart hij in het universiteitsblad Delta.[97] Maar Ockels laat zich niet ontmoedigen door praktische bezwaren: 'Je moet je ambities altijd net iets hoger leggen dan wat je mogelijk acht.'

Zonne-energie

FIG.47 Foto EC directoraat onderzoek

'De import van zonnestroom uit Afrika kan het begin zijn van een gemeenschappelijke energieregio van Europa, Midden-Oosten en Noord-Afrika'

Franz Trieb, onderzoeker Duitse lucht- en ruimtevaartonderzoekscentrum DLR

Blauwe daken

Als de zon schijnt, dan lachen de Duitsers. Nu heeft zomers weer in het algemeen wel een positieve invloed op het humeur, maar bij een kleine miljoen Duitsers is er meer aan de hand. Ze weten dat de zon hen geld oplevert: zo'n halve euro per kilowattuur zonnestroom.

Ik kom zo'n vier keer per jaar in Zuid-Duitsland en het viel me de laatste jaren op dat in het dorpje waar we dan verblijven iedere keer meer daken blauwe panelen dragen. Dat is opvallend, want in Nederland zie je dat nauwelijks en dan hooguit op nieuwbouwwoningen. In Duitsland verschijnen overal zonnepanelen waar een dak op het zuiden gericht staat. De verklaring daarvoor is een Duitse wet die in april 2000 van kracht werd: het *Erneuerbare-Energieen-Gesetz* (EEG) of de wet op de duurzame energie. Die wet stelt een royale vergoeding vast voor duurzame stroom die aan het net geleverd wordt. De hoogte van de vergoeding is verschillend voor de diverse soorten groene stroom. Voor zonnestroom bedraagt die vergoeding 57 eurocent per kilowattuur (ter vergelijking: u betaalt ongeveer 20 cent voor iedere kilowattuur op uw stroommeter).

De regeling geldt voor twintig jaar, waarbij het subsidiebedrag ieder jaar 5 procent vermindert. Die lange termijn maakt financiering van een *Solaranlage* mogelijk en aantrekkelijk. Te meer omdat afschrijving van de installatie en rente op de lening van de belasting afgetrokken mogen worden. Een rekenvoorbeeld voor een installatie van 40 vierkante meter met een elektrisch vermogen van 5 kilowatt laat zien dat op basis van 1000 uur zon per jaar de installatie niet alleen zichzelf na twintig jaar geheel heeft terugbetaald (30.000 euro geleend geld), maar dat ook een winst is behaald van ongeveer het zelfde bedrag. *'Lassen auch Sie sich vom Staat ein Solaranlage plus 30.000 euro schenken?!'* adverteert de website Der Solarserver.

FIG.48 Solaranlagen. In Duitsland heeft de EEG-wet voor duurzame energie veel particulieren ertoe aangezet te investeren in zonnepanelen. - Foto JW

De bekende Duitse journalist Franz Alt uit Baden Baden schrijft op zijn website: 'In 1993 begon voor mij en mijn gezin het zonnetijdperk. 4,8 kilowatt aan zonnepanelen en een zonnecollector kwamen op het dak. In het voorjaar kwam daar nog 4 kilowatt aan zonnepanelen bij. De 8,8-kilowattinstallatie levert jaarlijks tussen de 6000 en 7000 kilowattuur, waarvoor mijn energieleverancier mij ieder jaar tussen 3000 en 3500 euro betaalt. Dat maakt de zonnepanelen ruim kostendekkend. De acht vierkante meter zonnecollectoren op ons dak zijn voldoende om 225 dagen per jaar warm water te leveren, in plaats van vroeger met stookolie. Die collectoren sparen ons geld uit en bovendien twee ton CO_2 per jaar.

Onze zonnepanelen sparen daarnaast nog eens vier ton CO_2 per jaar uit. Wij produceren nu, in ons huis dat we in 1972 gebouwd hebben, ongeveer tweemaal meer stroom dan een doorsneegezin verbruikt.'[98]

Het EEG wordt gefinancierd uit een stroombelasting van 2,05 eurocent per kilowattuur. Die op 1 januari 2003 ingevoerde maatregel maakt deel uit van de zogenaamde Ökosteuer, die als pakket al op 1 april 1999 ingevoerd werd. Het doel was de belasting op arbeid te verminderen en die op milieubelastende activiteiten te verhogen. Voor een gemiddeld huishouden betekent de stroombelasting een verhoging van de jaarlijkse energierekening met 60 tot 70 euro.

Dankzij die stroombelasting is Duitsland Europees kampioen zonne-energie. Het geïnstalleerd vermogen bedroeg er eind 2003 400 megawatt.[99] In heel Europa was dat toen 550 megawatt (Nederland stond met 50 megawatt op de tweede plaats). Volgens opgaven van het Duitse *Umweltministerium* heeft de wet 130.000 banen opgeleverd in de productie en installatie van zonnecentrales.

Dat klinkt als een successtory, maar we moeten wel een oog op de cijfers houden. Volgens opgave van het Internationaal Energie Agentschap IEA bedroeg in Europa anno 2004 het aandeel van zonnestroom 1 op een totaal van 3.154 terawattuur.[100] Nog geen derde promille dus. In het meest groene scenario voorziet het IEA tot 2030 een spectaculaire groei van zonnestroom met een factor 78, maar ook dan is het aandeel nog maar een kleine 2 procent van het totale stroomgebruik.
De ontwikkeling van zonnecellen is nu zo'n vijftig jaar aan de gang. In het begin van de jaren vijftig werden de eerste zonnecellen van silicium ontwikkeld in de Bell Laboratoria in New York. Zonnecellen werden in 1958 aan boord van de eerste ruimtemissie al gebruikt. Maar het zou tot in de jaren tachtig duren voordat er productie op enige schaal plaatsvond. En nu zit de zonne-industrie na een trage start stevig in de lift. De productie groeit jaarlijks met 35 procent (jaarproductie van panelen van minder dan 100 naar 1500 megawatt in tien jaar tijd) en de prijzen zijn sinds 1990 met tweederde gedaald.

Maar nu groeit de industrie zo snel dat een tekort aan silicium de groei dreigt te beperken. In laboratoria zoekt men daarom naar manieren om zonnecellen te maken met minder silicium, of zelfs helemaal van kunststof. Ik maak een afspraak met Wim Sinke van het ECN. Vroeger was hij daar het hoofd van de afdeling zonne-energie, tegenwoordig heeft hij een bredere verantwoordelijkheid als stafmedewerker program en strategie op het gebied van zonne-energie. In 1999 ontving hij de Koninklijke/Shell prijs voor Duurzame ontwikkeling en energie.

Sinke (51) is tegenwoordig een druk bezet man. Hij moet zich even vrijmaken uit een conferentie om me te woord te staan. In zijn strakke pak en met zijn verzorgde baardje ziet hij er uit als iemand die het lab verruild heeft voor vergadertafels en daar nog plezier in heeft ook. Wanneer ik vraag of er nog doorbraken te verwachten zijn waardoor zonne-energie plotseling een stuk goedkoper gaat worden, kijkt hij een beetje vertwijfeld. Weet ik dan niet dat er aan de lopende band doorbraken gemaakt worden en dat die ervoor verantwoordelijk zijn dat zonnecellen alsmaar goedkoper zijn geworden. Hij pakt er een grafiek bij waarin de prijs van zonnecellen is uitgezet tegen de totaal geproduceerde hoeveelheid. De lijn begint in 1976 met een prijs van 80 dollar per watt en eindigt in 2001 met zo'n 6 dollar per watt. Ruim 90 procent goedkoper in dertig jaar. Dat die lijn daalt, is te danken aan talloze verbeteringen: efficiëntere productie en hogere rendementen. Als je die lijn doortrekt

tot 2030 voorspelt de grafiek dat zonnestroom tegen die tijd concurrerend zal zijn met stroom uit kolen of gas.

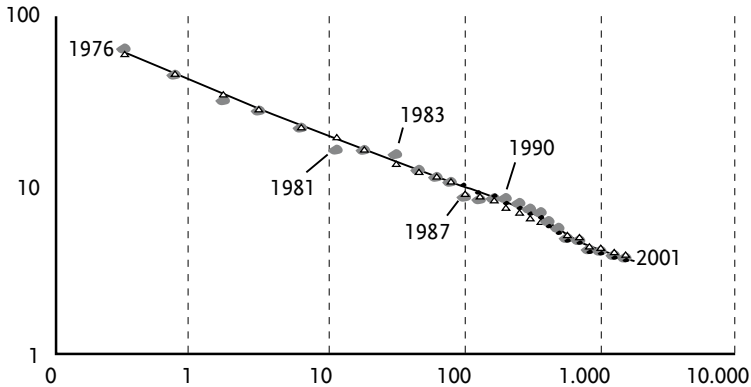

FIG.49 Prijs van zonnecellen in dollar per watt (verticaal) tegen het totaal geleverde vermogen in megawatt (horizontaal).
- Uit A Vision for PhotovoltaicTechnology, EC Dir. Gen. Research.

We lopen door de januaristorm naar de laboratoria aan de overkant. Even omkleden in blauwe stofjas en klompen. Dit is het laboratorium waar aan silicium zonnecellen gewerkt wordt. Het zijn de bekende blauwe vierkanten die hier bekend staan als multikristallijn silicium. Bovendien spreekt men hier niet over zonnecellen, maar over fotovoltaïsche cellen (of PV naar de engelse afkorting). Op de kast staat een nieuw type dat er anders uitziet doordat er geen rechte stroomdraadjes over het silicium lopen, maar in stervormen gerangschikt. Dat is een slimmigheidje dat de koppeling van zonnecellen moet vereenvoudigen. De stervormige verbindingen maken het mogelijk om de fotovoltaïsche cellen aan elkaar te schakelen door ze eenvoudig op een geschikte achtergrond te plakken. Dat scheelt werk en maakt een zonnepaneel dus weer iets goedkoper.

Een ander laboratorium kunnen we alleen van buiten bekijken. Hier wordt gewerkt aan zogenaamde dunnefilm zonnecellen. Is een gewone silicium zonnecel zo'n 0,2 millimeter dik, bij dunnefilm is dat 99,5 procent minder: ongeveer een duizendste millimeter. Men experimenteert in het laboratorium met een methode om silicium aan te brengen op een metaalfolie. De voornaamste uitdaging is om met zulke dunne films een hoog rendement te halen. Een (multikristallijne) silicium zon-

necel zet ongeveer 15 procent van het invallende licht om in stroom, bij een dunnefilmcel van amorf silicium is dat nu nog maar ongeveer de helft. Daarom werkt men aan een combinatie van amorf silicium met microkristallijn silicium in een gestapelde (tandem) structuur. Die twee verschillende vormen van silicium zijn gevoelig voor verschillende delen van het zonnespectrum en leveren in combinatie een hoger rendement dan apart. Behalve met silicium experimenteert men bij ECN en vele andere laboratoria met alternatieve dunnefilmmaterialen, met als doel lagere kosten te bereiken, of een hoger rendement. Veelgehoorde combinaties zijn CIGSS (koper indium/gallium diselenide/sulfide) en CdTe (cadmiumtelluride). De dunnefilmzonnecellenindustrie is een groeisector, maar op dit moment nog veel kleiner (minder dan 10%) dan de kristallijn-siliciumzonnecellenindustrie.

Een zonnecel bestaat in zijn simpelste vorm uit twee lagen silicium. Silicium is een zogenaamde halfgeleider, een stof waar je een stroom door kunt sturen, maar dan moet er wel energie bij. Dat komt doordat er nauwelijks vrije elektronen zijn, zoals bij koper of ijzer wel het geval is. Bij silicium zitten de elektronen vast in het rooster en hebben extra energie nodig om daaruit te ontsnappen. Die extra energie komt bij een zonnecel door invallend licht dat elektronen losmaakt uit het kristalrooster, waarbij zogenaamde gaten overblijven. Als er geen extra voorzieningen worden getroffen, valt zo'n vrij elektron na verloop van tijd weer terug op z'n plaats (in een gat) en aan de buitenkant valt niets te zien.

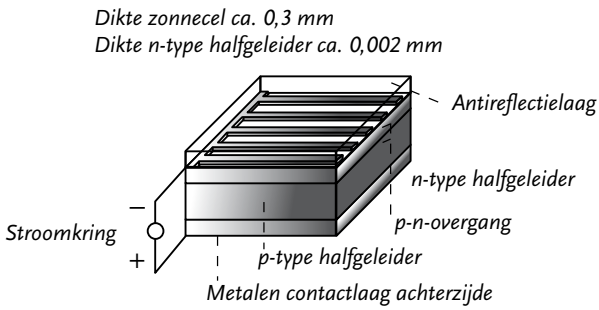

FIG.50 Opbouw van een zonnecel.

De slimmigheid van een zonnecel is dat er intern een voorziening is getroffen die een vrij elektron wegtrekt uit zijn omgeving (en een gat juist terugduwt) en de elektronenstroom buitenom terug laat lopen, waardoor er een bruikbare stroom ontstaat. De interne voorziening bestaat uit een elektrisch veld, dat het gevolg is van de grenslaag tussen twee verschillend behandelde stukken silicium.

De behandeling bestaat eruit dat er een kleine hoeveelheid van een ander element is toegevoegd. Bijvoorbeeld een beetje fosfor, waardoor één op de miljoen plaatsen in het kristalrooster door een fosforatoom wordt ingenomen. Het bijzondere aan fosfor is dat het vijf elektronen aan de buitenkant heeft, terwijl het maar door vier siliciumatomen wordt omringd. Met andere woorden: het fosforatoom levert een vrij elektron. Silicium met fosfor toevoeging wordt n-Si genoemd omdat het vanwege de overmaat aan elektronen de negatieve kant wordt.

Het omgekeerde gebeurt bij silicium waar borium is toegevoegd. Daar is steeds een elektron tekort. Borium heeft drie elektronen aan de buitenkant en moet dus steeds een elektron lenen van verderop. Zo'n wandelend gat gedraagt zich als een positieve lading en het boriumhoudende silicium is van het p-type.

Een interessant gebied is nu de overgang tussen de verschillende typen silicium, de zogenaamde n-p-overgang. De overmaat aan elektronen waaiert over naar de p-kant en het tekort (de gaten) naar de n-kant. Het gevolg is dat er aan weerszijden van de overgang een lading ontstaat: positief in het n-materiaal en negatief in het p-materiaal.

Wanneer een lichtdeeltje (foton) een elektron vrij maakt in het tussengebied, dan wordt het elektron door het heersende veld onmiddellijk in het n-materiaal getrokken. Het heersende veld blokkeert bovendien de terugkeer, zodat het elektron buitenom terug moet keren. Elektronen stromen van voorzijde (n-type) naar de achterkant (p-type), de stroomrichting is dan per definitie net omgekeerd. De achterkant is de pluspool van de zonnecel, de voorzijde de minpool. De spanning tussen beide is circa 0,6 volt.

Een zonnecel die het laboratorium nog niet of nauwelijks heeft verlaten, is de zogenaamde organische zonnecel, niet gemaakt van silicium, maar meer gemodelleerd naar de natuurlijke fotosynthese. Een voorbeeld daarvan is de Grätzelcel, ook wel de kleurstof-geactiveerde cel genoemd. Het principe werd in 1991 in Zwitserland bedacht door de

Duitse chemicus Michael Grätzel. In de eenvoudigste vorm bestaat zijn cel uit een laag zeer fijn poreus titaniumoxide (de witte stof uit verf en tandpasta) met daarop een hele dunne laag kleurstof voor de lichtabsorptie. De titaanoxide is aangebracht op een glasplaat met daarop een transparante geleider. De cel bestaat verder uit een tweede glasplaat met tussen de glasplaten als kleurstof een jodiumoplossing. Wanneer een lichtdeeltje een elektron vrijmaakt uit de jodium, verdwijnt dat elektron in de titaanoxide en het verlaat de cel via naar transparante geleider. Nadat het elektron zijn energie heeft afgegeven aan de buitenwereld keert het via de andere kant van de cel weer terug en vindt het via de jodiumoplossing zijn oorspronkelijke plaats weer terug. Op deze manier ontstaat een stroomkring en kan vermogen worden geleverd.

Een andere vorm van organische zonnecellen is de polymere cel, ook wel plastic zonnecel genoemd. Polymere cellen zouden in de toekomst misschien onzichtbaar licht kunnen omzetten in elektriciteit en zichtbaar licht kunnen doorlaten, waardoor men stroomproducerende vensters zou kunnen maken. Klinkt eenvoudig en ook veelbelovend, maar er is een hele lange weg te gaan voordat zulke cellen een voldoende hoog rendement en een voldoende lange levensduur zullen hebben. Kleine Grätzelcellen halen in het lab 11-12%, op grotere oppervlakken is dat ongeveer de helft. Polymere zonnecellen halen in het lab 5% en worden nog niet op grote oppervlakken gemaakt. Beide cellen zijn nog onvoldoende stabiel om in de buitenpraktijk toe te passen. Investeringen in de organische zonnecel worden wel als 'high risk, high potential' getypeerd. Er moet nog veel gebeuren, maar als het lukt gloort er een enorme markt voor doorzichtige folieachtige zonnecellen.

De waterstofcel

Een zonnecel die geen stroom opwekt maar waterstof heeft een groot voordeel: je kunt de energie opslaan tot de tijd dat je 'm nodig hebt. In de visie van het Engelse bedrijf *Hydrogen Solar* zullen in de toekomst de daken van garages bedekt zijn met waterstofproducerende brandstofcellen. Die produceren de brandstof voor de waterstofauto. Tanken doe je dan gewoon thuis. Platte daken in hete streken zullen bedekt zijn met de waterstofproducerende cellen, die niet alleen waterstof produceren,

maar die ook het gebouw koel houden zodat er minder airconditioning nodig zal zijn. Voor grootschaligere productie van waterstof zullen er waterstofboerderijen verrijzen, waar een groot oppervlakte aan zonnecellen geflankeerd wordt door een kleine loods voor de compressie en de opslag van waterstofgas.

Het klinkt misschien als sciencefiction, maar in december 2005 stond *Hydrogen Solar* op de tiende plaats van de *Scientific American* top 50 van veelbelovende onderzoeksprojecten. De aanleiding was de bekendmaking eerder dat jaar door Hydrogen Solar dat de splitsing van water in waterstof en zuurstof met een factor 10 was verbeterd. Op de negende plaats in diezelfde top 50 stond Michael Grätzel en dat is geen toeval.

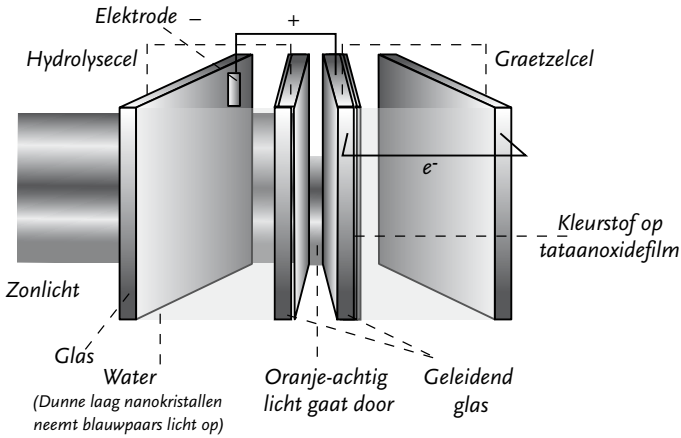

FIG.51 Waterstof uit zonlicht met de tandemcel. Licht valt vanaf links in de cel, ultraviolet en blauw licht wordt opgenomen door de nanokristallen van de achterwand van de voorste cel. De achterste cel zet de rest van het licht om in een elektrische spanning. De spanning van beide cellen samen is voldoende om watermoleculen in de voorste cel te splitsen.

Grätzel bedacht namelijk ook de tandemcel die *Hydrogen Solar* nu verder doorontwikkelt. De tandemcel lijkt op een vierdubbele ruit en bestaat uit twee vloeistofgevulde cellen achter elkaar. De sleutel tot de werking van de tandemcel is –net als bij de Grätzelcel – een extreem dunne laag nanokristallen van metaaloxide. Het effect van die nanocoating is een enorme vergroting van het effectieve oppervlak. De kristallen zijn 15 tot 20 nanometer (een miljoenste millimeter) klein en de coating bevat een poreuze

stapeling van metaaloxidekristallen. Als er licht op zo'n nanokristal valt, ontstaat een vrij elektron, dat direct weggeleid wordt door de geleidende achterwand naar een stroomdraad.

De voorste cel neemt het ultraviolet en blauwe deel van het licht op, de achterste cel – een Grätzelcel met titaniumoxide – werkt op de rest van het spectrum: van groen tot rood licht. De cellen zijn elektrisch met elkaar verbonden (in serie). Samen leveren ze voldoende spanning om water in de voorste cel te splitsen in waterstof (aan de voorste wand) en zuurstof.

Volgens *Hydrogen Solar* is het gelukt om meer dan 8 procent van het zonlicht direct om te zetten in waterstof. De industriestandaard, waarbij het commercieel lonend wordt, ligt op 10 procent. *Hydrogen Solar* is vol vertrouwen dat ze dat gaan halen en dat er over een paar jaar de eerste vierkante kilometers tandemcellen staan opgesteld ergens in een woestijn.

Sinke gelooft in de wetmatigheid van de dalende prijzen van zonnecellen en het toenemende aandeel in de stroomvoorziening. We groeien gestaag, zegt hij, maar vanuit een smalle basis. Sinke verwacht geen spectaculaire doorbraken die zonnecellen opeens spotgoedkoop maken. 'Als het zo eenvoudig was, hadden we het allang gevonden.' Doorbouwen dus met stapsgewijze innovaties en dan zit de productieprijs van fotovoltaïsche stroom in 2030 op slechts 2 cent per kilowattuur (uitgaande van 900 zonne-uren per jaar). Dan zal volgens 'ambitieuze maar realistische groeicijfers' 4 procent van de wereldstroomproductie uit zonnecellen afkomstig zijn (van welk type dan ook).[101] Daarna wordt nog een veel grotere groei verwacht doordat de prijzen dan concurrerend laag zouden zijn en het technisch potentieel nog lang niet bereikt. Over 25 jaar dus. Maar u weet: resultaten uit het verleden bieden geen garanties en voorspellen is moeilijk, vooral als het over de toekomst gaat.

Intussen klinken in zonneland Duitsland ook kritische stemmen. 'Een miljoen Duitse daken zijn in gebruik voor zonne-energie,' constateert de weekkrant *Die Zeit* in een commentaar, '800.000 zonnecollectoren voor warm water en 200.000 installaties voor zonnestroom. En de sector groeit met 10 procent per jaar. Maar,' constateert de commentator, 'de bijdrage aan het klimaat is onbeduidend (*bedeutungslos*), namelijk minder dan 2 promille van de stroomvoorziening. Alles goed en wel, maar wil je zon, ga dan naar Spanje.'[102] In Duitslands zonnigste stad Freiburg schijnt de zon 1800 uur per jaar. In Andalusië meer dan 3000 uur.

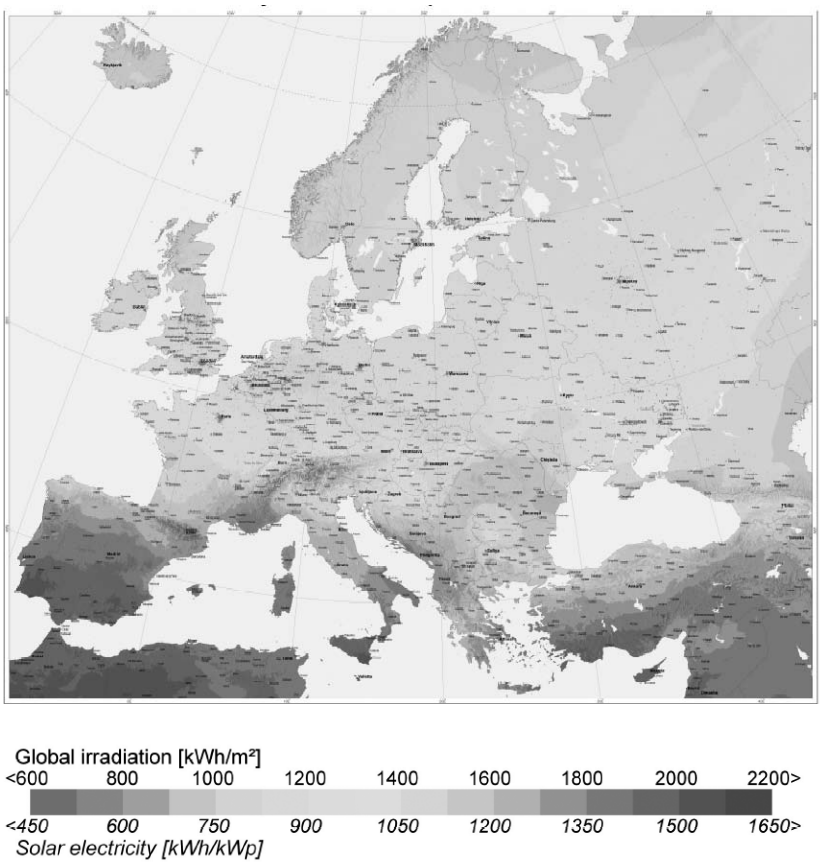

FIG.52 Invallende zonne-energie per m² per jaar (kWh/m²) resp. opbrengst van 1 kW zonnepaneel (piekvermogen) in kWh/jaar. - Bron: PVGIS, EC

Spiegels voor afrika

Steile bergweggetjes in een dor en verlaten woestijnlandschap. Onwillekeurig begin je hier '*Once upon a time in the West*' te fluiten. Wie vanuit Almería aan de Spaanse zuidoostkust het binnenland in rijdt, komt terecht in het landschap van de spaghettiwesterns. Op deze droge zongeblakerde vlaktes, met eindeloze bergketens in de achtergrond zijn heel wat films gedraaid. Hier en daar zijn nog decorresten te zien en voor de toeristen wordt in Mini Hollywood dagelijks om vijf uur stipt een bank overvallen. Nog steeds wordt deze streek, de Tabernas woestijn, door locatiebureaus aangeprezen als Europa's enige echte woestijn. Hier schijnt 350 dagen per jaar de zon. Alleen in maart 2004, toen ik er was, viel er een druilerige regen uit loodgrijze wolken. Een buitenkansje.

De busreis is georganiseerd door het Europese directoraat-generaal voor wetenschap, dat daarmee duurzame energie onder de aandacht van journalisten wil brengen. Na een uurtje rijden door het filmgenieke landschap komen we aan op een vlakte met futuristische bouwsels. Een verwarrende collectie aan spiegels in slagorde. Sommige gekromd als schotelantennes, andere hol als een trog en weer andere in rijen van kwart cirkels gerangschikt aan de voet van een witte toren. En allemaal met de spiegelende kant naar beneden, want van regendruppels hebben de spiegels een afkeer.

Dit, vertelde de Europese voorlichter, was de andere vorm van zonne-energie. Niet fotovoltaïsch (zonnecellen) maar zonnethermisch. Het '*Plataforma Solar de Almería*' (klemtoon op de i) is een onderzoeksinstelling die onder het Spaanse ministerie van wetenschap en technologie valt. Er zijn twee vergelijkbare instellingen, vertelt de voorlichter, het Weizmann-instituut in Israel en de *Sandia Laboratories* in Albuquerque, New Mexico in de Verenigde Staten. Maar nergens vind je zoveel verschillende opstellingen als hier. Zonnethermische energie is –mits de zon schijnt – een grootschalige en relatief goedkope vorm van zonne-energie. Bedek één procent van 's werelds woestijnen met zonnethermische centrales en je hebt meer elektriciteit dan de wereld aankan. Op de verkeerde plek weliswaar, maar daarover later verder.

FIG.53 Zonnetoren CESA-1 op Plataforma Solar de Almería. - Foto: EC directoraat research

Onderzoek naar zonnethermische energie, ook wel *Concentrated Solar Power* (CSP) genoemd, begon in de jaren zeventig in het kielzog van de energiecrisis. In Amerika bouwde men in de Mojave-woestijn een zonnethermische centrale met langgerekte parabolische spiegels (troggen genoemd). In het midden zit een glazen pijp (de absorptieleiding) met thermische olie. Het geconcentreerde zonlicht verhit de olie tot maximaal 400 graden Celsius. Daarmee wordt stoom opgewekt die een turbine aandrijft. In Californië heeft dit systeem al sinds 1985 ruim 354 megawattuur opgewekt. Met andere woorden: de techniek heeft zich bewezen.

In Spanje begint het onderzoek ook in de late zeventiger jaren, maar men legt zich hier niet vast op één technologie. Men wil de haalbaarheid van elektriciteitsopwekking met zonnewarmte bewijzen en bouwt daarvoor met Euopese gelden twee opstellingen met een bescheiden vermogen van 500 kilowatt: een met troggen en een met beweegbare spiegels (heliostats) rond een toren. Dat concept vindt zijn vervolg in het Spaanse zonnetorenontwerp CESA-1, een opstelling met een elektrisch vermogen van 1 megawatt.[103] Dan is het 1984 en lijkt het onderzoek aan impuls te verliezen, net als het meeste andere duurzame energie-onderzoek overal ter wereld.

In 1999 krijgt het onderzoeksprogramma door de toenemende manifestatie van het broeikaseffect een nieuwe impuls en samen met het Duitse instituut voor Lucht- en Ruimtevaart DLR wordt een 3 megawatt zonnethermische installatie ontwikkeld. Sinds 2004 is zonnethermische energie ook business geworden. De *Planta Solar Thermica 10* van

het bedrijf Solucar wordt de eerste commerciële zonnethermische centrale in Europa en er staan veel andere in de planning. Voor de PS 10 is januari 2007 de financiering rondgekomen.

Toch is, ondanks 25 jaar onderzoek, de techniek van de zonnetorens nog niet uitontwikkeld. Het concept is vrij eenvoudig: je hebt rond een hoge toren (90 meter ongeveer), met in kwart kringen opgestelde draaibare spiegels, heliostats genoemd omdat ze de zon volgen. De spiegels hebben een enigszins gekromd oppervlak om het licht te concentreren. De *Planta Solar 10* telt 761 heliostats met een oppervlak van 121 vierkante meter elk. Samen 90.000 vierkante meter. De spiegels bundelen het zonlicht op een brandpunt bovenin de toren. Het zonlicht wordt daar met een factor 500 geconcentreerd, wat een verzengend thermisch vermogen van 3,3 megawatt per vierkante meter oplevert.

Tot zover is de techniek vertrouwd. Maar op welke manier je die enorme hitte het best om kunt zetten in elektriciteit, daarover lopen de meningen uiteen. Bij de PS 10 is gekozen voor water als transportmedium. Door de warmtewisselaar bovenin de toren wordt water gepompt onder 40 atmosfeer druk dat aan de kook raakt. Zo ontstaat stoom van 250 graden waarmee een stoomturbine aangedreven wordt. Dat klinkt ruig, maar voor een stoomturbine is 250 graden aan de koele kant. Hoe heter, hoe beter, luidt vrij vertaald de Carnot-cyclus. Hoe hoger het temperatuurverschil tussen de warme en koude kant van het proces, des te hoger het rendement. Voor een kolen- en gascentrale ligt dat rendement van warmte naar elektriciteit op zo'n 40 procent, maar de zonnetoren komt met stoom van 250 graden niet verder dan 28 procent. Bijna driekwart van de energie verlaat de toren als onbruikbare warmte.

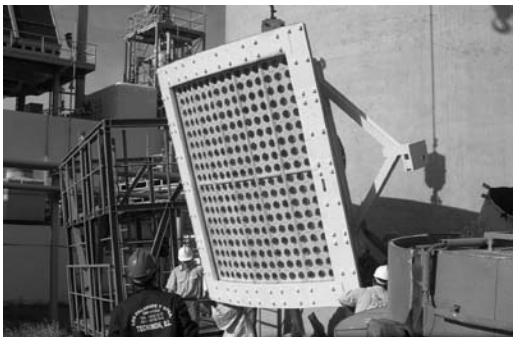

FIG.54 De hetelucht warmtewisselaar wordt de toren ingehesen.
Foto: EC directoraat research

Onderzoekers van het *Plataforma Solar de Almería* vinden dat onder de maat. Ze doen onderzoek naar een ander transportmedium voor de zonnewarmte: hete lucht. Manuel Romero van het Spaanse energieonderzoekscentrum CIEMAT legt aan het publiek van journalisten zijn project *SOLAIR* (zon + lucht) voor. Op de kleinere zonnetoren, waar spiegels een vermogen van 3 megawatt thermisch bundelen, experimenteren Spaanse en Duitse onderzoekers met materialen die tegen zoveel zonnehitte bestand zijn. De keuze is nu gevallen op keramisch materiaal. Daarmee wordt een module samengesteld die aan de voorkant 2,5 bij 2,5 meter groot is, en die aan de achterkant taps toeloopt in een buis. Aan de voorkant worden zwarte keramische elementen geplaatst die aan de voorzijde doen denken aan luidsprekerboxjes. Het fijnmazige keramiek moet de lucht snel kunnen opwarmen.

Het geheel heeft wel wat weg van een enorme beeldbuis. Romero vergelijkt de werking met die van een haardroger: je hebt koele lucht die je over een heet oppervlak leidt en aan de andere kant komt er hete lucht uit. Maar aan wat hier de toren binnenkomt kun je je vingers beter niet branden. De lucht wordt 680 tot 1000 graden heet. 80 procent van de zonnewarmte wordt overgedragen aan de lucht. Met de hete lucht wordt stoom gemaakt van 460 graden bij 65 atmosfeer. Dat levert naar verwachting een rendement van 35 procent in de omzetting in de turbine naar elektriciteit. De resultaten zijn bemoedigend, maar de techniek is nog experimenteel. Duitse onderzoekers van het DLR zijn op zoek naar ander keramisch materiaal dat vrijwel niet uitzet. Want bij zulke extreme temperaturen gaat alles wat uitzet en krimpt binnen de kortste keren kapot.

Het maximale vermogen van de zonnetoren wordt beperkt door de afstand van de heliostats tot de toren. Als richtlijn houdt men aan dat de achterste spiegels niet verder dan een kilometer van de toren mogen staan. Door de wind trillen de spiegels namelijk altijd een beetje en bij een afstand van meer dan een kilometer zou het licht te ver naast de ontvanger terecht komen. Het bijbehorende maximale vermogen is dan ongeveer 30 megawatt aan elektriciteit. Ter vergelijking: dat is 5 procent van het vermogen van een gemiddelde gasgestookte centrale of tien keer meer dan een filnke windturbine.

Net als bij de zonnetorens, wil men in Almería ook bij de zonnetroggen overstappen op hogere temperaturen. Geen kwaad woord over de trouwe installatie in de Mojave-woestijn bij Californië, maar de temperatuur is maximaal 400 graden, anders verbrandt de olie. En dat beperkt

het rendement van de omzetting van zonnewarmte in elektriciteit. Dus wil technisch directeur Eduardo Zarza van het *Plataforma Solar de Almería* van die olie af. In een interview met *De Ingenieur* vertelt hij dat hij water en stoom in plaats van olie wil gebruiken. 'Directe productie van stoom in de absorptieleiding levert twee belangrijke voordelen op,' aldus Zarza. 'Allereerst zijn de investeringskosten lager doordat dure thermische olie niet langer nodig is. Ten tweede ligt het rendement hoger.'[104] In 2007 bouwt het *Plataforma Solar* samen met een aantal bedrijven een proefcentrale met troggen die direct stoom produceren. Het ontwerp bestaat uit zeven rijen met elk tien troggen van honderd meter lang. Zeven kilometer gekromde spiegels met een gezamenlijk oppervlak van 38.000 vierkante meter. De zonnewarmte zal stoom produceren met een temperatuur van tussen de 400 en 550 graden. Het elektrisch vermogen zal naar verwachting 5 megawatt bedragen en het rendement is waarschijnlijk vergelijkbaar zijn met dat van de zonnetorens: 21 tegen 23 procent.[105] Ter vergelijking: een zonnepaneel (fotovoltaïsch) heeft een typisch rendement van 15 procent.

Zonnetroggen zijn commercieel aantrekkelijk, verwacht Zarza, door hun hoge rendement en de modulaire opbouw. Maar net als bij de zonnetorens is ook hier het maximale vermogen tamelijk klein. Bij grotere installaties dan zeg 50 megawatt worden de leidingen te lang en treedt er teveel verlies op van warmte aan de omgeving. Dat zal de praktische grootte beperken, verwacht Zarza.

Power tower

FIG.55 Bron: unergy.org

Het filmpje op de site van het Australische bedrijf *EnviroMission* sleurt je mee in een toekomstvisioen. Ergens in de Australische *outback* doemt een

naald op in het woestijnlandschap. Een hoge slanke schoorsteen temidden van een cirkel van glas. Een karretje rijdt in een tunnel onder het glazen dak door, een afstand van anderhalve kilometer. De temperatuur stijgt van 30 graden aan de rand tot 70 graden bij de toren. In de basis van de betonnen schoorsteen zijn rondom windturbines aangebracht. Hier trekt de hete lucht doorheen, de schoorsteen door. Bezoekers kunnen de lift nemen, langs de buitenkant van de toren, naar de rand 500 meter boven het landschap. Tot zover het visioen.
Ondanks het futuristische uiterlijk is de zonnetoren niet nieuw. Leonardo da Vinci schijnt zelfs al eens zoiets geschetst te hebben. Recenter ontwierp de Duitse civiele ingenieur Jörg Schlaich een prototype met een vermogen van 50 kilowatt. In 1982 verrees een 200 meter hoge toren in Spanje bij de stad Manzanares, 150 kilometer ten zuiden van Madrid. De toren was omringd door een platte transparante kas van 240 meter doorsnede, opgetrokken uit plastic platen. In die enorme broeikas werd het 17 graden heter dan in de omgeving. De zonnetoren heeft 30 maanden gedraaid en leverde in die tijd 118 megawattuur. Een gemiddeld vermogen van 5 kilowatt. Het principe was daarmee bewezen, maar de opbrengst gering. Dus verdween het plan, zoals zoveel duurzame energieprojecten in de tweede helft van de tachtiger jaren, in een la.

Twintig jaar later is de zonnetoren terug. Schlaichs firma in Stuttgart werkt sinds enkele jaren samen met het bedrijf *EnviroMission* in Australië om daar een tien keer hogere toren neer te zetten dan destijds in Spanje. Oorspronkelijk wilde men zelfs een 1000 meter hoge toren bouwen, maar die ambitie is inmiddels gehalveerd. ‘Subsidie of niet, die kleinere toren komt er,’ zegt initiatiefnemer Roger Davey van *EnviroMission* in *NRC Handelsblad* (4 nov 2006). Maar wanneer kan hij niet zeggen. Het plan is om de zonnetoren in het district Burronga te bouwen, bij het plaatsje Mildura in Zuidoost-Australië, zo’n 500 kilometer van Melbourne.

De straling van de zon verwarmt de lucht onder de transparante dak. De hete lucht trekt door de schoorsteen omhoog. De luchtstroom zal met ongeveer 50 kilometer per uur door de 32 windturbines trekken rondom de voet van de betonnen toren. Dat levert naar verwachting 50 megawatt aan elektriciteit op.

Het klinkt leuk, maar in feite is de zonnetoren vreselijk inefficiënt. De helft van de warmte straalt direct via het transparante dak weg en van de warmte die wel door de turbines in de schoorsteen terechtkomt, wordt slechts een fractie omgezet in stroom. Het rendement (van warmte naar stroom) bedraagt iets minder dan 1 procent. Maar, zeggen optimisten, voor niks gaat de zon op, dus alles is winst.

Anderen hebben berekend dat ook de klimaatwinst van de toren erg gering is. Volgens Helmut Mäckel van de Australian National Universiteit in Canberra moet ze toren 50 jaar lang zonnestroom leveren om de CO_2 uit te sparen die nodig is voor de productie van het cement. Mäckel ziet dan ook meer in de 153 megawatt zonnethermische centrale die ook bij Mildura gebouwd gaat worden.

De zonnetoren mag dan niet de handigste manier zijn om zonnewarmte om te zetten in elektriciteit, het is wel een project dat tot de verbeelding spreekt. Dat element wil *EnviroMission* uitbaten. 'De toren zou de TAG-Heuer zonnewijzer kunnen heten,' suggereert Davey tegenover de *New Scientist* (31 jul 2004), 'de grootste zonnewijzer ter wereld. Of de Viagra-toren.' Sponsoring en toerisme zouden de zonnetoren lonend kunnen maken. Tegelijk zou de *power tower* als groen icoon kunnen dienen. Dat is een hele opsteker voor een tamelijk conservatief land dat op energiegebied vooral bekend is vanwege de grote voorraden steenkool en uranium.

Zonnethermische energie is 'hot' in Spanje. Zeker sinds in 2004 bij koninklijk besluit is bepaald dan zonnethermische centrales voor subsidie in aanmerking komen. De afnameprijs bedraagt gegarandeerd 18 cent per kilowattuur (bij productiekosten van 14 cent) en bovendien mogen de centrales tot maximaal 15 procent bijstoken met aardgas, zodat ze er zeker van kunnen zijn dat de centrale ook blijft leveren als er een wolkje voor de zon drijft.

De lijst aan projecten is lang en waarschijnlijk achterhaald wanneer u dit leest. In juli 2006 werd gebouwd aan een 10 megawatt toren nabij Sevilla en een 50 megawatt trog bij Almería. Een tweede even grote trog is in ontwikkeling (projectnaam Andasol), net als een 15 megawatt toren ten noordwesten van Cordoba. Plannen zijn er verder voor twee zonnetorens van 20 megawatt en een 50 megawatt trog ten westen van Sevilla en zeven troggen van 50 megawatt ten westen van Toledo. Opgeteld: 565 megawatt. Dat is net zoveel als het totale Europese opgestelde

vermogen aan zonnepanelen, maar door de locatie (350 dagen per jaar zon) zal de opbrengst waarschijnlijk een stuk hoger uitvallen. Net als bij fotovoltaïsche opwekking, wordt ook bij zonnethermisch een flinke kostenreductie verwacht. Men denkt rond 2020 voor 5 cent per kilowattuur te kunnen produceren.

De volgende stap is volgens Zarza die naar de overkant van de Middellandse Zee. Hij gaat er als vanzelfsprekend van uit dat Afrika in de toekomst een belangrijk deel van de Europese energie zal leveren. 'Nu levert Algerije gas, vooral aan Spanje en Portugal,' redeneert Zaza. 'Maar die voorraden zijn eindig, terwijl het land de inkomsten goed kan gebruiken. Een alternatieve inkomstenbron, bijvoorbeeld door de export van elektriciteit, is dus welkom. Momenteel bouwt Algerije een kleine zonnethermische installatie in combinatie met een conventionele centrale. Ook landen als Marokko en Egypte hebben interesse in zonnethermische opwekking,' aldus technisch directeur Zarza in *De Ingenieur*. De zon schijnt er nog 15 procent krachtiger dan in Spanje zodat een oppervlakte van minder dan 1 procent van 's werelds woestijnen voldoende zou zijn om zonnethermisch genoeg elektriciteit op te wekken voor de hele wereld. Maar hoe krijg je die op de plaats van bestemming?

Franz Trieb en collega's van het Duitse onderzoeksinstituut DLR (ook betrokken bij de keramische zonneontvanger) hebben daar in opdracht van het Duitse ministerie van milieu aan gerekend. De meest futuristische optie was het snelst verworpen. Opwekken van waterstof, opslag en transport daarvan vanuit de Sahara naar Noord-Europa 3000 kilometer verderop zou een verlies van 75 procent betekenen. Met andere woorden: slechts een kwart van de opgewekte energie zou de gebruikers in Europa bereiken. Daarmee vervalt die optie. Een andere mogelijkheid zou een lange elektriciteitskabel zijn tussen Europa naar Noord-Afrika. Een gewone hoogspanningsleiding zou over een dergelijke afstand een verlies van 45 procent betekenen, maar een speciale hoogspanningsleiding met gelijkstroom[106] in plaats van de gebruikelijke wisselstroom zou dat verlies beperken tot 10 tot 15 procent, aldus de Duitse onderzoekers. En dat maakt import van elektriciteit uit Noord-Afrika en het Midden-Oosten volgens hen tot een reële optie. Zij adviseren om in 2020 een hoeveelheid van 60 terawattuur vanuit Afrika te importeren. Dat is 1,5 procent van het totale Europese elektriciteitsgebruik van 4000 terawattuur per jaar. Even om een beeld te krijgen: daarvoor is ongeveer

14 gigawatt aan opgesteld vermogen nodig, en dat is dus 30 keer meer dan alle gebouwde en geplande zonnethermische installaties in Spanje bij elkaar.[107] Op lange termijn in 2050 richten Trieb en zijn collega's zich zelfs op 700 terawattuur per jaar uit zonnethermische bron. Dat betekent 17,5 procent van het Europese elektriciteitsverbruik uit een opgesteld vermogen van 166 gigawatt (of 300 keer de geplande capaciteit in Spanje).

Dat betekent een forse investering, schrijven de onderzoekers. En niet alleen in spiegels en stroomkabels, maar even goed in goede relaties met de zuiderburen. Zij kunnen ons energie leveren, wij hun water en technologie. 'De import van zonnestroom uit Afrika kan het begin zijn van een gemeenschappelijke regio van Europa, Midden-Oosten en Noord-Afrika,' aldus Franz Trieb. 'We zouden moeten beginnen met een vrijhandelszone voor duurzame energie om uiteindelijk te komen tot wat prins El Hassan Bin Talal (voorzitter van de Club van Rome) een 'gemeenschap voor energie, water en klimaatbescherming' noemt.'[108]

Kernenergie

FIG.56 Foto: COVRA

'In Europa komt een derde van de elektriciteit uit kerncentrales. Nederland is met 4 procent een beetje vreemde eend in de bijt. Als je nou één of twee centrales erbij zou bouwen, dan zou je een betere mix hebben.'

Tim van der Hagen, hoogleraar reactorfysica TU-Delft.

Een of twee kerncentrales erbij

De veertig jaar oude onderzoeksreactor van de TU-Delft staat aan het eind van de Mekelweg, de ruggengraat van het Delftse universiteitsterrein. Vanaf de A13 tussen Den Haag en Rotterdam is achter de weilanden een klein metalen bolletje te zien met een slanke pijp ernaast, het prototype van een kernreactor. Het is de thuisbasis van hoogleraar reactorfysica Tim van der Hagen die vaak in het nieuws is als het over kernenergie gaat.

Onder druk van CO_2-toename en de slinkende gasvoorraad komt kernenergie steeds vaker naar voren als CO_2-vrije energiebron met een groot potentieel. In Nederland heeft staatssecretaris Pieter van Geel (VROM) gezegd de bouw van een tweede kerncentrale niet uit te sluiten[109] en op het internationale podium heeft de Engelse onafhankelijke wetenschapper James Lovelock, vader van de Gaia-theorie,[110] vriend en vijand verbaasd door kernenergie als 'de enige groene oplossing' te kwalificeren. 'We hebben geen tijd om te experimenteren met visionaire energiebronnen,' schreef Lovelock. 'De beschaving is in gevaar.'[111]

De dag voordat ik Van der Hagen bezoek, had de ingenieursvereniging KIVI-NIRIA in de aula van de TU een congres georganiseerd onder de dubbelzinnige titel 'Kernenergie, de principes voorbij'. Ik was benieuwd naar de plannen binnen de nucleaire gemeenschap.

Wanneer we, voorzien van een badge voor stralingsmeting, voor de stalen deur staan van het reactorhal, drukt Van der Hagen op een intercom. 'Ik vraag nu toestemming om naar binnen te gaan,' licht hij toe. 'Heren, kom verder,' klinkt het. 'Ik wil met een journalist naar het tweede bordes.' 'Akkoord,' zegt een stem. Gezoem klinkt als de elektrisch bediende vergrendeling openschuift. Kloink! We gaan binnen in een muf ruikende stalen sluis. Alles ziet er nog uit als in de zestiger jaren. Grote kasten aan de wand met gloeiende controlelampen en zware drukknoppen. De stalen deur valt achter ons in de grendels. 'Dit is een luchtsluis,' legt Van der Hagen uit. 'Binnen in de hal heerst een kleine onderdruk, dus mocht er een lek optreden in de stalen mantel, dan gaat

er alleen lucht van buiten naar binnen en niet andersom.' Klenk, kloink. En de deur naar de hal gaat open.

We stappen in een verbazend hoge ruimte, de binnenkant van de koepel. De stalen spanten zijn wit geverfd, wat de ruimte nog vergroot. Middenin staat een grote betonnen bak. Een trap leidt langs de koepelwand omhoog. We klimmen de 18 meter omhoog, trekken dan gele oversloffen aan om te voorkomen dat er radioactief materiaal aan de schoenzolen zou blijven hangen, en komen dan bij een overloopje over het bassin. Onderin, goed zichtbaar tussen alle buizen en slangen in het stille water, gloeit de reactorkern met een fascinerend blauw licht: Cerenkovstraling, het gevolg van snelle elektronen vanuit de kern die door het omringende water worden afgeremd. 'Dit is het heilige der heilige,' zegt Van der Hagen. 'Dit kunt u niet zien bij een kerncentrale, want daar zit de reactorkern ingepakt in een groot stalen vat van 20 centimeter dik staal dat onder hoge druk staat. Het verschil is dat de temperatuur hier veel lager blijft. De temperatuur interesseert ons niet, hier gaat het om de straling. Terwijl men bij een kerncentrale juist een hoge temperatuur wil, zeg 300 graden bij 150 atmosfeer om een zo hoog mogelijk rendement te halen bij de omzetting van warmte naar elektriciteit.[112] Het gaat ons puur om de neutronenstraling.'

De reactor van de TU wordt niet voor energieopwekking gebruikt, maar voor stralingsonderzoek. Dit is een van de drie kernreactors in Nederland, maar geen kerncentrale. De andere onderzoeksreactor staat in Petten. Daar wordt ook materiaalonderzoek gedaan en er men maakt er radioactieve preparaten voor de gezondheidszorg. Nederland heeft maar één kerncentrale en die staat in Borsele. In 1973 werd de centrale in gebruik genomen en in 2006 besloot het kabinet Balkenende dat Borssele tot 2033 in gebruik blijft. Met zijn maximale vermogen van 450 megawatt draagt de centrale 4 procent bij aan de elektriciteit in Nederland.

Maar als het aan de bezoekers van het Kivi-Niria-congres ligt, blijft het daar niet bij. Oud-premier Ruud Lubbers sprak op het congres over 'kernenergie in het politieke landschap', Tim van der Hagen gaf er een 'overzicht van moderne kerncentrales' en directeur-generaal milieu (VROM) Van der Vlist gaf er de 'randvoorwaarden nieuwe kerncentrales'. Twintig jaar na Tsjernobyl begint de nucleaire lobby op stoom te raken. 'Ach, lobby,' reageert Van der Hagen, 'we hebben kernenergie gewoon nodig. We hebben geen keus. We hadden een luxe positie door het gas dat we uit de bodem haalden waarmee we onze elektriciteit konden maken. We weten nu dat die voorraden allemaal eindig zijn en we

weten ook dat de CO_2-uitstoot mogelijkerwijs een probleem is voor het klimaat. Er is een besef gekomen dat we een enorm probleem hebben als het om de energievoorziening gaat. In de komende vijftig jaar zitten we met het probleem hoe we dat op peil moeten brengen. Daar zullen we echt niet alleen kernenergie bij nodig hebben, maar ook schoon fossiel, zonne-energie, windenergie, biomassa. Maar dat duurt nog zo lang. Eigenlijk wonen we in de verkeerde huizen in Nederland, we werken in de verkeerde fabrieken en we rijden in de verkeerde auto's. Maar dat schakel je niet in één keer om. Dat kost decennia.'

Borssele blijft langer open, er wordt gepraat over een nieuwe kerncentrale in 2015. Wat is het uiteindelijke idee? 'Het zou heel redelijk zijn,' vindt Van der Hagen, 'als Nederland een gemiddelde speler zou zijn in West-Europa. In Europa komt een derde van de elektriciteit uit kerncentrales. In Nederland is dat 4 procent. We zijn dus een beetje vreemde eend in de bijt. Als je nou één of twee centrales erbij zou bouwen, dan zou je een betere mix hebben. Dan zou je een mix hebben van kolen, kernenergie en duurzame bronnen. En het aandeel gas zou je langzamerhand terug kunnen laten lopen. Zo'n mix lijkt me een hele goede situatie.'

FIG.57 Montagetekening van nieuwe centrale in Finland.

En dan is er nog het probleem van de financiering. Een moderne kerncentrale van het type dat ook in Finland gebouwd wordt (*European Pressurised water Reactor* of EPR) kost drie miljard euro. Wie gaat dat betalen? Volgens Van der Hagen is dat het minste probleem. Op het congres sprak ook managing director Alting von Geusau van de

ING-bank. Die verklaarde bij herhaling dat het bedrag geen probleem was. Mits er goede afspraken gemaakt kunnen worden met de overheid. Een kerncentrale gaat zestig jaar mee, dus wil men een garantie van de overheid dat er gedurende die termijn gedraaid kan worden zolang men aan alle wettelijke regels voldoet. Van der Hagen heeft er weinig twijfel over dat investeerders te vinden zijn wanneer de overheid operationele zekerheid geeft.

Ook over politieke steun is Van der Hagen gematigd optimistisch. 'Ik ben van mening dat de partijen die aanvankelijk negatief stonden ten opzichte van kernenergie, in zullen zien dat we zonder kernenergie echt tegen een tekort in de elektriciteitsvoorziening aan zullen lopen. Het is niet anders. Er zijn geen keuzes op dit moment. Het is niet het een of het ander, we moeten alle opties inzetten. En ik hoor ook van de PvdA genuanceerdere meningen dan een tijd geleden.[113] De nood is echt heel hoog.'

Kernfusie

Kernfusie is die andere vorm van kernenergie. Anders dan bij kernsplijting smelten bij kernfusie twee lichte atoomkernen samen tot een zwaardere. Dat levert een hoop energie op. Mensen hebben zich eeuwen afgevraagd waar de zon zijn energie vandaan haalt, en of de brandstof nooit op zou raken. Pas sinds 1920 is bekend dat de zon zijn energie uit kernfusie put. Iedere seconde zet de zon 600 miljoen ton waterstof om in helium. Dat gaat naar schatting nog vier tot vijf miljard jaar zo door, zodat de zon pas ongeveer halverwege zijn bestaan is.

Geen wonder dat men na de Tweede Wereldoorlog ging proberen om die energiebron ook op aarde aan te boren. Het perspectief was veelbelovend: de brandstof voor het fusieproces bestaat uit deuterium (waterstof met een extra neutron) en uit het metaal lithium, dat in de reactor wordt omgevormd in tritium (waterstof met twee neutronen). Aan lithium geen gebrek en deuterium is een bestanddeel van zeewater (0,0035 procent ervan). De hoeveelheid deuterium in een liter zeewater is theoretisch voldoende om in een fusieproces een gezin twee jaar van stroom te voorzien. Er is genoeg deuterium in de oceanen om de wereld miljoenen jaren van energie te voorzien, al zal het niet meevallen om het laatste beetje te win-

nen. Een gigawatt fusiecentrale zal jaarlijks 100 kilogram deuterium nodig hebben en drie ton lithium. Een vergelijkbare kolencentrale gebruikt anderhalf miljoen ton steenkool (en produceert daarbij vier tot vijf miljoen ton CO_2). Het fusieproces is niet alleen CO_2-vrij, het levert ook geen radioactief afval. Wel worden de reactorwanden radioactief. En wat erger is: ze raken door de straling beschadigd waardoor ze al na vijf jaar vervangen moeten worden. En waar laat je ze dan?

Enthousiaste wetenschappers verklaarden in de jaren zestig al dat dertig jaar later kernfusie de wereld van energie zou voorzien. Dat zeggen wetenschappers nog steeds, maar ze weten nu wel een stuk beter waar ze over praten. Cynische wetenschapsjournalisten hebben het vertrouwen verloren en zeggen: 'Kernfusie is de energie van de toekomst. En dat zal altijd wel zo blijven.'

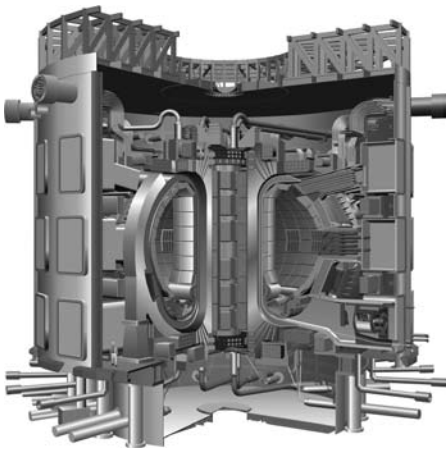

FIG.58 Doorsnede van de ITER kernfusiereactor. – Afbeelding www.iter.org

Kernfusie op aarde verloopt anders dan op de zon. In het binnenste van de zon vindt het fusieproces plaats onder extreem hoge druk bij een temperatuur van tien miljoen graden. Op aarde kunnen we dergelijke drukken niet bereiken, zodat de benodigde temperatuur ruim tien keer hoger moet zijn: 150 miljoen graden. Bij miljoenen graden zijn gassen veranderd in een plasma waar kernen en elektronen niet meer aan elkaar gebonden zijn en kriskras door elkaar bewegen. Fusie vindt plaats als een deuteriumkern en een tritiumkern samensmelten tot een

heliumkern en een los neutron. Sterke magneetvelden omsluiten de plasmavlam, zodat die niet tegen de reactorwand kan komen. Daardoor zou de temperatuur teveel dalen. De reactorruimte heeft de vorm van een holle ring (Amerikanen spreken over een donutvorm en Russen noemen het een tokamak) die rondom omgeven is door magneten en koelbuizen. De hoeveelheid brandstof in de reactor is zeer gering: ongeveer een gram in 1000 kubieke meter. Een veilig idee, want daardoor kan het fusieproces nooit op hol slaan. Als de brandstofaanvoer stopt, dan stopt ook het fusieproces.

Voorlopig is juist het aan de gang houden van het fusieproces het belangrijkste probleem. De JET-opstelling (*Joint European Torus*) in Engeland heeft in 1997 het record gevestigd met een productie van 16 megawatt aan warmte. De volgende experimentele fusiereactor ITER (*International Tokomak Experimental Reactor* of ook *de weg* (Latijn)) die in 2017 in Cadarache, Frankrijk operationeel moet worden, moet dit record met een straatlengte verbreken. Naar verwachting zal ITER 500 megawatt warmte gaan leveren met een input van 50 megawatt. Een energievermenigvuldiging met een factor tien. Daarvoor is een opstelling nodig van 24 meter hoog en 34 meter doorsnede. Daarbinnen is de ring (torus) van acht meter hoog en met een diameter van zes meter. De benodigde 4,7 miljard euro worden in tien jaar tijd bijeengebracht door de onderzoekspartners: EU, Japan, China, Rusland, VS en Zuid-Korea.

Volgens waarnemers is zo'n wereldwijde deelname tekenend voor de huidige status van het onderzoek. Iedereen wil meedoen, omdat de resultaten bemoedigend zijn, maar tegelijkertijd is de praktische toepassing nog zover weg dat men elkaar nog niet als concurrent ziet. Misschien gaat een Russische fusiepionier nog gelijk krijgen: 'We gaan het potentieel van kernfusie niet onder de knie krijgen voordat het een noodzaak wordt.'

Uiteindelijk is kernenergie waarschijnlijk een overgangsfase omdat ook de wereldvoorraad uranium beperkt is. Wereldwijd zijn er 441 kerncentrales in gebruik, er zijn 24 in aanbouw en 41 gepland.[114] Met die hoeveelheid kernreactoren is het makkelijk winbare uranium na ongeveer twintig jaar op. Uit armere ertsen is dan nog ongeveer voor dertig jaar te putten, tegen hogere energie en winningkosten, maar dan is het op. Het rapport *'The Future of Nuclear Power'* van het *Massachusetts Institute of Technology* komt tot dezelfde schatting: 'Wij geloven dat de wereldwijde

voorraad aan uraniumerts voldoende is om duizend reactors in de komende halve eeuw van brandstof te voorzien'.[115]
Theoretisch is er een uitweg en kan tijdens de kernsplijting nieuwe brandstof aangemaakt worden. Zelfs meer dan gebruikt wordt: een soort nucleaire perpetuum mobile. Dat gebeurt in de kweekreactor. Het actieve deel van het uranium tijdens de kernsplijting is het U-235. Deze lichtere isotoop (de rest is U-238) maakt van nature slechts 0,7 procent uit van het uranium. Dat is te weinig om een kernreactie mogelijk te maken, dus wordt het uranium verrijkt tot het percentage aan U-235 drie procent bedraagt. Bij kernsplijting valt het U-235 atoom in twee delen uiteen waarbij naast energie en straling ook twee tot drie neutronen vrijkomen. In een gewone reactor worden de neutronen afgeremd (door water of grafiet) zodat ze de juiste energie hebben om een volgend uraniumatoom te kunnen splitsen. Zo ontstaat een kettingreactie. Regelstaven in de kern vangen neutronen in om te voorkomen dat de reactie te snel verloopt. Als de regelstaven geheel naar beneden staan, dooft de kettingreactie.

In een snelle kweekreactor worden de neutronen niet afgeremd (vandaar de term 'snel'), maar ingevangen door het niet-splijtbare U-238 dat daardoor veranderd in het Pu-239, plutonium. Plutonium is wel splijtbaar, net als U-235. Per tijdseenheid kan een kweekreactor meer splijtstof produceren dan hij verbruikt. In principe kan op die manier nog tienduizenden jaren kernenergie bedreven worden. Over duurzaam gesproken...

Helaas kleven er nogal wat bezwaren aan de kweekreactor. In de eerste plaats is dat de splijtstof plutonium, een metaal dat door de alfastraling[116] erg kankerverwekkend is, in het bijzonder voor het skelet en bij inademing van fijne deeltjes in de longen. Daarnaast is het ook giftig. Verder kunnen enkele kilo's van het materiaal al een kritische massa bereiken, waardoor spontaan een kettingreactie op gang kan komen. Dat hoeft niet meteen tot een kernexplosie te leiden, maar ook een plasje gesmolten plutonium op de vloer is geen prettig gezicht. De eigenschap van een kleine kritische massa maakt plutonium ook erg geschikt voor het gebruik in kernwapens. Proliferatie is dus een groot punt van zorg. Momenteel schijnt er twintig jaarlijks ton plutonium geproduceerd te worden en de wereldvoorraad bedraagt naar schatting 300 ton. Het lijkt in ons aller belang dat daar niet veel meer bijkomt.

Plutonium is een droom voor een natuurkundige genoemd, en een nachtmerrie voor een ingenieur.[117] De avonturen met kweekreactoren

tot nu toe onderschrijven dat. Vanaf de jaren zeventig zijn er zes kweekreactoren in gebruik geweest, daarvan zijn er nu nog twee over: de Franse Phénix en de Russische BN-600. Allemaal hebben ze problemen gehad met het vloeibare natrium dat als koelvloeistof wordt gebruikt. Water is onbruikbaar omdat het de neutronen teveel zou afremmen. Maar natrium is een lastig goedje. Zodra het met lucht of water in contact komt, vliegt het in brand. In de Japanse kweekreactor Monju is in december 1995, enkele maanden na de ingebruikname, brand uitgebroken en sindsdien is de centrale niet meer in gebruik geweest. De directeur pleegde zelfmoord toen pogingen het ongeval te verdoezelen mislukten. Ook in de Franse Super Phénix trad amper een jaar na de ingebruikname in 1986 een natriumlek op. Vier jaar later stortte het dak in na een flinke sneeuwbui, waardoor de centrale vier jaar buiten gebruik bleef. Vanaf 1994 heeft de centrale weer gedraaid, maar drie jaar later besloot de politiek er de stekker uit te trekken. *Tant pis*.

Vlak over de grens in Duitsland tenslotte verrees in 1972 de snelle kweekreactor in Kalkar. In 1985 loopt het natrium door het systeem en is de reactor klaar voor de eerste tests. Maar als op 26 april 1986 de centrale van Tsjernobyl ontploft, draait het publiek de experimentele centrale massaal de rug toe. In de jaren erna wordt de centrale eindeloos getest en bloedt het bedrijf Interatom langzaam dood doordat er wel kosten zijn (5 miljoen euro per maand), maar jarenlang geen inkomsten. De centrale wordt 'kaputt geprüft'. In 1991 wordt de stekker eruit getrokken zonder dat de centrale ooit stroom heeft geleverd. De bouw en de gedeeltelijke sloop hebben uiteindelijk 7 miljard euro gekost. Investeerder Hennie van der Most mocht het complex voor 2,5 miljoen hebben en bouwde het om tot een lucratief attractiepark met een hotel met 400 bedden. Het lijkt na dit alles niet eenvoudig om een investeerder te vinden voor een nieuwe kweekreactor.

Een stralende erfenis

Eén aspect is in het vorige hoofdstuk buiten beschouwing gebleven: radioactief afval. Niet omdat het geen rol speelt, maar omdat het zelfs door veel voorstanders als het enige echte probleem van kernenergie wordt gezien.

In Nederland is de COVRA (Centrale Organisatie voor Radioactief Afval) bij Vlissingen belast met de verwerking en de opslag van al het radioactief afval. Op weg daar naartoe, speurend naar havennummer 8601 in het industriegebied Vlissingen-Oost, vallen de hoogspanningsleidingen op die hier van alle kanten samenkomen. Aan de linkerkant van de weg eindigen ze in een gigantisch transformatorstation dat het uiteinde vormt van Nederlands enige kerncentrale, in Borssele (480 megawatt) aan de Westerschelde. Aan de rechterkant van de weg staat het bordje COVRA. Directeur Hans Codée is een vijftiger in pak, met als opvallendste eigenschap de pretoogjes achter zijn kleine brilletje. Hij heeft enkele uren de tijd genomen om me rond te leiden. Openheid is hier een bedrijfspolicy. Via de website kan iedereen een excursie of rondleiding bespreken om zelf te kijken ('neen, geen virtuele rondleiding') hoe er met radioactief afval wordt omgesprongen.

Mijn belangstelling gaat uit naar het hoogradioactieve afval van de kernreactor. Gevaarlijk spul dat enorme hoeveelheden straling en warmte afgeeft. Hoe behandel je zoiets, hoe kun je dat veilig opslaan zonder gevaar voor brand of lekkages? Hans Codée zegt me toe mijn vragen te zullen beantwoorden, maar voor COVRA is het slechts een klein gedeelte van de werkzaamheden: gemiddeld eens in de twee maanden komt er een lading aan die dan bijgezet wordt in het HABOG (Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslag Gebouw), een nucleair mausoleum met tijdelijke functie. Op zich spectaculair, maar verreweg het meeste werk is de verwerking van laagradioactief afval zoals laboratoriumafval, handschoenen en glaswerk, maar ook bestralingsbronnen, rookmelders, pompen en buizen en radioactief schroot. Laagradioactief afval stelt de COVRA-medewerkers ook voor de vreemdste problemen. 'Wat moet je doen met een koelkast die radioactief besmet is geraakt,'

geeft Codée als voorbeeld, 'of wat te doen met twee radioactieve goudvissen?'. De eerste is samengeperst, de tweede zijn gecremeerd en hun radioactieve as is bijgezet in een met cement afgevulde ton.

De verwerking van radioactief afval is destijds door minister Pieter Winsemius van VROM (1984) goed geregeld, vindt Codée. De constructie is zo dat COVRA vanaf het ophalen van het materiaal tot en met de eindberging verantwoordelijk is. De klanten betalen daar een tarief voor dat samenhangt met het soort afval en met de hoeveelheid. Voor hoogradioactief afval is een andere verrekening ingesteld, maar ook daar zorgt COVRA voor afhaal, transport, verwerking, opslag en eindberging. De tarieven zijn zo berekend dat de exploitatie gedekt wordt en dat er een bedrag van 1,5 miljard euro gespaard wordt over een periode van honderd jaar. Tweederde daarvan komt van het hoogradioactief afval, eenderde van het laagradioactief afval. Het totaalbedrag is gereserveerd voor de inrichting van een eindberging waarvan nog niemand precies weet welke vorm die zal aannemen. Volgens Codée is de regeling van Winsemius, dat één instantie de eindverantwoordelijkheid neemt voor al het radioactief afval, in een land uniek in de wereld. Het voorkomt gesleep en gesjoemel. Voor die tijd, tot 1982, werd laagradioactief afval in de zee gedumpt en het hoogradioactief afval ging naar opwerkingsfabrieken in Engeland (Sellafield aan de Ierse zee) of Frankrijk (La Hague in Normandië). Het werd daar verwerkt en tijdelijk opgeslagen totdat Nederland een geschikte opslagfaciliteit had.

Het zou tot 1990 duren voordat de bouw kon beginnen, want aanvankelijk wilde geen enkele gemeente een depot van radioactief materiaal op zijn gebied. Ook niet de gemeente Petten, waar de COVRA vanaf 1984 tijdelijk gehuisvest was op het terrein van ECN. Uiteindelijk was het de gemeente Borsele die groen licht gaf. Daar was men inmiddels wel aan wat nucleaire activiteit gewend geraakt, bovendien leek het praktisch om de opslag vlak naast de kerncentrale te vestigen.

Het grootste deel van het 20 hectare grote terrein wordt in beslag genomen door tamelijk non-descripte witte loodsen, waarvan er nu drie clusters staan, maar er is nog ruimte voor ettelijke andere. Ik volg Codée naar binnen. Behalve een stralingsdosismeter zijn er geen bijzondere maatregelen of kledingvoorschriften. We lopen door wat automatisch bediende draaideuren en komen in een grote vrijwel lege hal: de verwerkingshal. Hier arriveert het afval vanuit bedrijven, laboratoria en ziekenhuizen. De normale procedure is dat het afval in stalen vaten wordt verzameld, die vaten worden samengeperst totdat ze nog maar een de-

cimeter hoog zijn. Een aantal van die platte vaten gaat samen in een wijder zwart vat waarna het vat gevuld wordt met beton. Als de straling aan de buitenkant van het vat een bepaalde drempel overstijgt, krijgt het hele vat nog een 20 centimeter dikke betonnen mantel.

Die zwarte vaten en betonnen cilinders staan vijfeneenhalve meter hoog opgestapeld achter de pneumatisch bediende schuifdeuren. Blokken van honderden vaten lang en tientallen breed tot aan het plafond. Blok na blok na blok tot in de duistere uiteinden van de loods en daarnaast nòg een halfvolle loods. De oogst van twintig jaar nucleaire activiteit in de lage landen met jaarlijks duizend vaten van 200 liter.

FIG.59 Het HABOG. – Foto: COVRA

De blikvanger van het terrein is de knaloranje bunker waarin het hoogradioactief afval ligt opgeslagen. De kunstenaar William Verstraeten heeft bedacht dat de knaloranje kleur in de loop van de komende eeuw langzaam zal verbleken naar wit naarmate de inhoud minder radioactief wordt. Op de muur levensgroot in groene letters Einstein's formule $E = mc^2$, de massa-energie equivalentie die de basis vormt van kernenergie. In 2001 kwam de koningin zelf naar Borssele om het HABOG te openen.

Ruim vijf jaar later ziet de bunker er nog splinternieuw uit. Dat mag natuurlijk ook wel als het voor een eeuw gebouwd is met muren van 1,7 meter dik beton. De controlekamer laat ons binnen en we lopen naar de ontvangstruimte waar het hoogradioactief materiaal per vrachtwagen of trein wordt aangevoerd. Het betreft uitgewerkte brandstofstaven uit de kernreactoren in Delft en Petten of materiaal dat via de opwerkingsfabrieken Sellafield of La Hague afkomstig is uit de inmiddels gesloten

kerncentrale in Dodewaard of de overbuurman Borssele. Het materiaal zit voor transport verpakt in een loodzware container die hier vanaf de vrachtwagen of treinwagon op een op rails verrijdbaar platform wordt gehesen. Dan gaat het door een dikke groene stalen deur naar de ruimte ernaast. Daar wordt de laatste handeling met mensenhanden verricht: de bouten van de deksel van het vat worden losgedraaid, waarna de container door een rode stalen deur naar de volgende ruimte wordt gereden.

Die ruimte is fel verlicht met natriumlampen. Voor de deur is een stalen schot van 30 centimeter dik aangebracht dat voor de deur gerold wordt en dat vergrendeld wordt met een 10 centimeter dikke stalen pin. Het is een voorzorgsmaatregel die moet voorkomen dat in geval van een aardbeving – toch tamelijk zeldzaam in Zeeland – de gewone deur open zou gaan terwijl daar binnen zwaar stralend afval behandeld wordt.

Vanuit de naastgelegen controlekamer, waar twee mannen waken over 's lands nucleaire erfgoed, geeft een meer dan een meter dik venster met loodglas zicht op de geel verlichte ruimte. Van hieruit worden de containers met afstandsbediening geopend. Het hoogradioactief afval is door de opwerkingsfabriek in een met een stalen mantel omgeven cilindrische glaskern gegoten met een inhoud van circa 200 liter en een gewicht van 400 kilogram. Die cilinder wordt hier vanachter de beschutting van het loodglas uit de transportcontainer gehesen en met een kraan naar de bergingsruimte gebracht.

De bergingsruimte is een ruimte zo groot als een sporthal met overal in de vloer opvallende cirkelvormige putdeksels. Sommige hebben een rode sticker (vol), andere een gele (halfvol) en veel zijn nog kaal. Terwijl we hier lopen krijg ik het ongemakkelijke gevoel dat er zich hoogstralend materiaal onder mijn voeten ligt. Geen zorgen, zegt Codée, iedere put is afgedicht met een stop van anderhalve meter dik beton en staal, zodat er geen straling naar boven door kan dringen.

Op een dwarsdoorsnede van het gebouw is te zien dat het afval in negen meter lange pijpen onder de bergingsruimte hangt. Behalve radioactieve straling is er nog een punt van zorg: warmte. Wanneer een glascilinder net aangeleverd is, straalt hij warmte als een kacheltje (2000 watt). In de loop van 100 jaar loopt dat exponentieel terug naar 100 watt. Die warmte moet ergens heen. In het HABOG is gekozen voor een passieve koeling die niet afhankelijk is van elektriciteit of menselijk handelen. Een luchtrooster hoog in de gevel (als veiligheidsmaatregel voor een overstroming) voert lucht aan naar onderin de buizenruimte. Bovenin de ruimte zijn vier schoorstenen aangebracht waardoor de opgewarm-

de lucht afgevoerd wordt. Een natuurlijke luchtstroming (warme lucht stijgt naar boven en de onderdruk zuigt koele lucht aan) zorgt voor de koeling. Meters in de schoorstenen houden in de gaten of er geen radioactieve stoffen de lucht ingaan, maar eigenlijk is dat onmogelijk omdat het materiaal in glas gevat zit en bovendien ook nog eens afgesloten zit in de opslagbuizen.

Koude kernfusie

In april 1989 verschenen de namen Fleischmann en Pons op de voorpagina's van alle kranten. Ze hadden koude kernfusie ontdekt en daarmee de belofte van een schone, eenvoudige en eindeloze bron van energie. In een haastig geschreven artikel in het *Journal of Electroanalytical Chemistry* deden ze verslag van een experiment dat volgens hen duidde op kernfusie in een bekerglas. Wat honderden onderzoekers decennia lang voor elkaar probeerden te krijgen in steeds grotere en duurdere kernfusiereactoren, dat zouden Martin Fleischmann en Stanley Pons in Utah op een laboratoriumtafel hebben geëvenaard. Twee dagen later kreeg Dr. Pons een staande ovatie van 7.000 vakgenoten op een congres van het Amerikaanse Chemische genootschap en begin mei zouden de fusiepioniers op audiëntie mogen komen bij president Bush.

De proefopstelling van Fleischmann en Pons is kinderlijk eenvoudig: een bekerglas water met in het midden een anode van palladium en aan de zijkant een kathode. De beker staat in een soort thermosfles. Wanneer er stroom door de opstelling gestuurd wordt, vindt er een zekere warmteontwikkeling plaats. Maar als het water vervangen wordt door zwaar water (met deuterium in plaats van waterstof), vindt er opeens veel meer warmteontwikkeling plaats. Zoveel zelfs dat Fleischmann en Pons stelden dat chemische reacties niet de oorzaak konden zijn. Zij trokken de conclusie dat er een kernreactie moest plaatsvinden, hoewel ze daar geen aanwijzingen voor hadden.

Het applaus verstomde al vrij snel toen anderen het experiment probeerden te herhalen en dat meestal niet lukte. Maar sommigen lieten weten dat ook bij hen onverklaarbare extra warmte was ontstaan. Al vrij snel tekende zich een schisma af in de wetenschappelijke gemeenschap: een meerderheid van sceptici tegenover enkele gelovigen. En tussen die twee groepen was er nauwelijks meer communicatie.

Theoretisch is koude kernfusie onverklaarbaar. Het is bekend dat het metaal palladium waterstof en ook deuterium aan zich bindt, maar het is onverklaarbaar hoe twee gebonden deuteriumkernen zo dicht opeen geperst worden dat fusie plaats zou vinden. Bovendien, als er kernfusie van deuterium plaats zou vinden, dan zou je ook fusieproducten moeten aantreffen: tritium of neutronen. Die zijn er veel minder dan je op basis van de geproduceerde warmte zou verwachten. Ook helium of gammastraling, de mogelijke andere fusieproducten, zijn te weinig aanwezig. De gelovigen antwoordden eenvoudigweg dat als de theorie een experiment niet kan verklaren, dat dan het experiment voorrang heeft.

Een theoretische verklaring komt er in 1991, maar die doet meer kwaad dan goed. Een zekere Randell Mills, een arts met kandidaatsdiploma scheikunde, verklaart dat de vrijkomende energie afkomstig is van waterstofatomen waarvan het elektron plotseling veel dichter bij de kern terechtkomt waardoor het waterstofatoom veel kleiner wordt: een 'hydrino' noemt Mills dat. Door waterstof in de hydrino-toestand te brengen met een lagere energie dan de grondtoestand zouden eindeloze hoeveelheden energie te winnen zijn. Hij publiceert hierover een 1700 pagina's dik boek met de titel *The Grand Unified Theory of Classical Quantum Mechanics* dat hem voor de wetenschap definitief ongeloofwaardig maakt. Zelfs Wikipedia rubriceert Mills onder pseudo-wetenschap. Dat weerhoudt kranten er niet van om over hem te schrijven. Investeerders hebben al miljoenen in zijn duistere onderneming Blacklight Power, Inc. gestoken.[118]

De meest gerespecteerde experimenten zijn uitgevoerd door onderzoekers van de Amerikaanse marine. In februari 2002 schreven de onderzoekers Mosier-Boss en Szpak eenduidig en herhaalbaar bewijs te hebben voor koude kernfusie. Iedereen heeft verkeerd gekeken, stelden zij. Het geheim ligt volgens hen in de moleculaire structuur van de palladiumelektrode. Als die geschikt is krijg je fusie en anders kun je het vergeten.

Vijftien jaar na het eerste experiment is de controverse nog steeds niet beslist. In 2004 was een panel van het Amerikaanse *Department of Energy* (DoE) 50/50 verdeeld over de vraag of de experimenten tot dan toe aanleiding gaven tot een wetenschappelijke vaststelling dat onverklaarbare warmte was geproduceerd. En zo blijft de mythe in leven.

In 2002 gaf kernfysicus Rusi Taleyarkan van het Oak Ridge nationaal laboratorium een nieuwe draai aan het fusieverhaal. Hij beschreef in *Sci-*

ence kernfusie in imploderende belletjes in vloeibare aceton. De belletjes werden opgewekt door geluidsgolven. Als ze even later in elkaar klappen, geven ze een lichtflits (*sonoluminescentie*). In de imploderende belletjes zouden druk en temperatuur voldoende hoog zijn voor kernfusie. Andere groepen geven miljoenen dollars uit om het experiment te verifiëren, maar vier jaar later is ook dit experiment onbeslist. Het blad *Nature* stelt op 8 maart 2006 voor om de zaak maar te laten rusten en zich met andere zaken bezig te houden. Koude kernfusie is qua reputatie vergelijkbaar met de lijkwade van Turijn of graancirkels. Maar ook die komen regelmatig terug in het nieuws.

Volgens een recente publicatie in *Nature* is opslag van radioactief materiaal in glas minder probleemloos dan het lijkt.[119] Brits-Amerikaans onderzoek brengt voor het eerst de schade in beeld die alfadeeltjes en plutoniumatomen teweeg brengen in het omringende kristal. Ze doen dit met een geavanceerde kernspinresonantietechniek, die ik hier buiten beschouwing zal laten. De uitkomst is wel van belang, namelijk dat de schade aan de kristalstructuur vijf keer groter blijkt dan men tot nu toe dacht. Heliumkernen knallen door het kristal als een kanonskogel door een balzaal – in de woorden van Nobelprijswinnaar Roald Hoffmann – en verstoren de kristalstructuur. Dat klinkt abstract, maar op mensenschaal leidt dat ertoe dat het materiaal op den duur amorf wordt en tot poeder uiteenvalt. Dat gebeurde ook met het grafiet in de eerste experimentele kernreactoren: het zwol op en werd korrelig van structuur. Toendertijd een merkwaardig en onbegrepen fenomeen. Nu weten we dat het verval van de kristalstructuur een gevolg is van alfastraling. Dat betekent bijvoorbeeld dat het mineraal zirkoon, dat veel gebruikt wordt voor opslag van radioactief afval, al na 1400 jaar kan gaan lekken, terwijl het honderdduizenden jaren mee moet gaan.

Toch is dat volgens Hans Codée, directeur van de COVRA, geen reden tot zorg. 'Farnans resultaten zijn heel belangrijk voor de ontwikkeling van stralingsbestendige materialen,' verklaart Codée tegenover de VPRO Noorderlicht.[120] 'Maar deze manier van verpakken is maar één schakel in de keten van het veilig opbergen van gevaarlijke materialen. Wij treffen zoveel veiligheidsmaatregelen dat deze bevinding geen reden is ons zorgen te maken.

Maar hoe zit het met de fase daarvoor? Uitgewerkte brandstofstaven uit Borssele gaan naar de opwerkingsfabriek. Daar worden ze opgelost in geconcentreerd zuur. Uranium en plutonium, samen maken ze 95 procent van het materiaal uit, worden uit de oplossing gewonnen voor hergebruik. Onbruikbare nevenproducten als strontium, cesium en technetium, samen slechts 5 procent van het oorspronkelijke materiaal, worden zo goed mogelijk uit de oplossing teruggewonnen, gedroogd en in glas gegoten, in welke vorm ze dan retour afzender gaan. Het resterende oplosmiddel wordt traditiegetrouw geloosd op zee.

Vooral de opwerkingsfabriek bij Sellafield aan de Ierse Zee heeft nogal een reputatie op dat gebied. Zozeer zelfs dat er in 1981 een naamswijziging heeft plaatsgevonden. De oorspronkelijke naam was Windscale, maar in reactie op de slechte reputatie besluit de directie in 1981 tot een naamswijziging naar Sellafield, naar een ander nabij gelegen plaatsje. Maar ook die naam is inmiddels besmet geraakt. Net als de omgeving.

Aan de kust worden hoge concentraties radioactief materiaal gemeten als gevolg van de lozingen. Schelpdieren, vissen en zeewier bevatten hoge concentraties radioactieve verontreinigingen en onafhankelijke studies tonen aan dat rond Sellafield meer gevallen van leukemie voorkomen dan elders in Engeland. Ouders die de fabriek aansprakelijk willen stellen, raken stelselmatig verward in juridische procedures waarin het oorzakelijk verband tussen de radioactieve vervuiling en de kankergevallen aangevochten wordt. De verontreiniging beperkt zich overigens niet tot de Engelse westkust. Ierland dringt al jaren aan op sluiting van de fabriek vanwege de vervuiling die ook in Ierland meetbaar is. Ja, zelfs tot in Noorwegen zijn verhoogde concentraties van technetium-99 meetbaar. Uit vrees voor consequenties voor de visvangst en -kweek ziet ook Noorwegen Sellafield liever vandaag dan morgen sluiten.

Het meest recente ongeluk in Sellafield dateert van 18 april 2005.[121] Toen ontdekte men dat er een pijp gebarsten was, waardoor maar liefst 83 duizend liter salpeterzuur op de grond was gelekt, waarin 20 ton uranium en 160 kilogram plutonium zat opgelost. Het lek werd ontdekt door een camera-inspectie van een bassin van 60 meter lang en 20 meter diep, dat ontoegankelijk is voor de medewerkers. Een voorlichter van British Nuclear Group Ltd, die verantwoordelijk is voor de bedrijfsvoering in Sellafield, benadrukte dat er geen slachtoffers waren en dat er geen radioactief materiaal naar buiten gelekt was. Een projectgroep werd ingesteld om de schade te herstellen.

De reputatie van de Franse opwerkingsfabriek in La Hague is weliswaar minder erg, maar ook hier worden regelmatig verhoogde stralingsniveaus vastgesteld. Zo meldde Greenpeace in november 2006 dat het grondwater onder de fabriek zwaar verontreinigd was met tritium, een zware isotoop (één proton, twee neutronen) van waterstof. Tritium is radioactief en gevaarlijk bij inname van grote hoeveelheden. De hoeveelheid tritium in het grondwater was 200 keer hoger dan de norm voor drinkwater. Overigens kon in het drinkwater nog geen extra tritium vastgesteld worden, zodat omwonenden zich geen zorgen hoefden te maken. Het is echter niet uitgesloten dat op termijn het grondwater via kwel wel de drinkwaterreservoirs bereikt.

Hans Codée wijt de ongelukken aan een old-boys-mentaliteit. De fabriek in Sellafield stamt uit de nucleaire periode in 1952 toen Engeland een kernwapen ontwikkelde. 'Er was maar één doel: we moeten een bom maken. Men had niet zo'n oog voor veiligheid en milieu. Uit die periode stammen nog veel oude installaties.'

Amerika heeft een soortgelijke nucleaire erfenis. Onderzoeker Robert Alvarez, lid van het *Institute for Policy Studies* in Washington, bracht in 2006 een rapport uit over de nucleaire opslagfaciliteit *Y-12 National Security Complex* in Oak Ridge, Tennessee.[122] Een complex dat in 1940–1950 werd gebouwd en waar hoogverrijkt uranium werd geproduceerd voor de atoombom op Hiroshima (6 augustus 1945). Daarna is er nog veel meer materiaal geproduceerd voor het nucleaire wapenprogramma, maar nu is het vooral een bergplaats voor 400 ton hoogradioactief uranium (wereldwijd is er meer dan 1750 ton '*weaponsgrade*' uranium). Alvarez telde niet minder dan 22 ernstige incidenten in nog geen tien jaar tijd (1997–2006). Regelmatig ontploffen er vaten hoogverrijkt uranium, breken er branden uit door kortsluiting of door oververhitting door radioactiviteit.

Om verantwoord om te kunnen gaan met radioactief afval, moet je afstand nemen van de ouderwetse cowboymentaliteit in de nucleaire branche, vindt Codée. Hij zegt dan ook blij te zijn dat de COVRA niet op Petten is gevestigd, waar zich al een zekere mentaliteit had gevestigd, maar in Borsele waar een verse start gemaakt kon worden met veiligheid en risicobeheersing als uitgangspunt. 'Een land heeft een hoog niveau van democratie nodig en een hoog niveau van individuele verantwoordelijkheid,' stelt Codée, 'om goed om te kunnen gaan met radioactief afval.' Dat klinkt doordacht maar ook een tikkeltje verontrustend, want hoe staat het met de democratie in China, Rusland, Noord-Korea

en Iran? En bovendien: wat te denken van 22 ongelukken in tien jaar tijd op een militaire opslagfaciliteit in het democratische en individualistische Amerika? Het populair-wetenschappelijke blad *New Scientist* was er vlot uit en kopte 'Disaster waiting to happen'.[123]

Maar zelfs als opslag van kernafval voor de eerste eeuw ordentelijk is opgelost, blijft de vraag: waar kun je kernafval met een gerust hart voor de eeuwigheid bergen? Een vraag waarvan filosofen zeggen dat ze het menselijk verstand te boven gaat. Maar toch: het radioactief afval is er nu eenmaal en het blijft duizenden jaren gevaarlijk. Wereldwijd ligt er 200.000 ton aan afgewerkte brandstofstaven in tijdelijke behuizingen. Dus je moet wat. Verschillende landen bedenken daarvoor diverse oplossingen. In Amerika wil men het afval een eindberging geven in het Yucca-gebergte. Drie geologische breuklijnen in de nabijheid, vulkanische activiteit en de nabijheid van Las Vegas op 145 kilometer afstand pleiten daar feitelijk tegen.

In Europa heeft Finland het voortouw genomen. Voor de twee kerncentrales van Russische makelij in Loviisa was er een regeling dat het afval retour ging naar Rusland, waar het in de Mayak opwerkingsfabriek nabij Chelyabinsk behandeld werd en opgeslagen. Dat contract liep echter in 1996 af. Toen in 1989 de muur viel en het Russische rijk in verval raakte, besefte men in Finland dat men op nucleair gebied zelf de broek op moest houden. In 1994 werd er een amendement geformuleerd bij de kernenergiewet, waarin stond dat radioactief afval voortaan op eigen grond verwerkt en geborgen moest worden. Er werd een onderneming opgezet, Posiva Oy, die met de berging belast werd. Het bedrijf koos uit vier proeflocaties de plaats Eurajoki in de nabijheid van Olkiluoto, waar ook de nieuwe centrale gebouwd gaat worden. De onderneming had daarbij de steun van de lokale bevolking. Sterker nog: de gemeente Eurajoki heeft geconcurreerd tegen een andere plaats vanwege de honderden banen en de extra belastinginkomsten. Het afval zal 500 meter diep geborgen worden in twee miljard jaar oud graniet. De kosten van verwerking en berging over een periode van 40 jaar worden geschat op 1,6 miljard euro. Het grootste deel daarvan (1,4 miljard) is al beschikbaar in het nucleair afvalfonds dat bijeengebracht is door een opslag op de stroomrekening. De opslag bedraagt ongeveer 0,23 eurocent per kilowattuur, of 10 procent van de stroomkosten. De eindberging zal volgens voorlichter Veli-Matti Ammala van Posiva Oy bestand zijn tegen de volgende ijstijd: 'Over 30.000 jaar kan er drie kilometer ijs boven ons

liggen, en over 100.000 jaar is het klimaat weer net als nu. Dit systeem moet daar tegen kunnen.'[124] Over vooruitdenken gesproken.

In Australië gaan stemmen op om een deel van het land uit te roepen tot mondiale eindberging van kernafval. Kernfysicus en computerprogrammeur Geoff Hudson uit Melbourne zet op een rijtje waar een plek voor zo'n berging aan moet voldoen: geen geologische breuklijnen, droog, ver weg van zee, nauwelijks bewoond, liefst op een eiland en onder een betrouwbaar regime. 'Als je het mij vraagt,' zegt Hudson, 'is Australië de duidelijke winnaar.' Een relatief kleine berging van 100 bij 100 bij 10 meter in de Australische woestijn moet genoeg zijn voor de huidige 200.000 ton. Vervolgens rekent hij weifelende landgenoten voor dat Australië uranium verkoopt voor 60 dollar per kilo, maar dat het als kernafval 300 dollar per kilogram oplevert. Waarom nog delven als je kunt bergen, vraagt hij retorisch.[125]

Ook in Nederland worden originele plannen ontwikkeld. Het tijdschrift *Natuur Wetenschap & Techniek* kwam in 2006 met een dossier kernenergie, waarin ook een eindberging voor kernafval was voorzien: 'een niet elegante, maar wel afdoende oplossing: berg het op in klei- of zoutlagen diep onder de grond. Dat kan veilig en voor een heel lange tijd. Het enige wat er nog moet gebeuren is het vaststellen van een locatie met optimale geologische eigenschappen'.[126] Het plan blijkt afkomstig uit de koker van Hans Codée. 'Het is een probleem met geologische tijdschaal, dus je moet ook geologisch denken,' verklaart hij zijn plan. Zo'n vijftig kilometer ten westen van Texel zou een kunstmatig eiland ingericht moeten worden van waaruit een pijp een kilometer naar beneden gaat, tot onder een zoutlaag. Daar zouden de vaten met kernafval in gangen geborgen moeten worden. De zoutlaag dient daarbij als afsluitende mantel. Zout in de ondergrond heeft de substantie van tandpasta. Dus zelfs als er een aardbeving optreedt, is het onwaarschijnlijk dat het materiaal een weg naar boven zou vinden omdat scheuren zichzelf dichten. In de natte en zoute omgeving ligt het voor de hand dat de vaten vrij snel doorroesten en dat er radioactief materiaal vrijkomt. Volgens het tijdschrift *NW&T* is dat geen probleem, want 'de inhoud sijpelt zo langzaam door het zout heen dat het geen gevaar oplevert. Met de tijd neemt de radioactiviteit van het afval immers af.'[127] Overtuigd? Gelukkig mogen we er nog even over nadenken. Tot nu toe gaat men er in Nederland (en ook in Finland) vanuit dat het afval bereikbaar moet blijven, het moet 'terugneembaar' zijn. Daar voldoet de eindberging op zee in ieder geval niet aan.

Aardwarmte

FIG.60 Stoom komt vrij bij diepteboring in Soultz (Elzas).
- Foto: EU directoraat onderzoek

'De warmte van een kubieke kilometer graniet dat afkoelt van 200 naar 180 graden Celsius is even groot als de energie-inhoud van 1,3 miljoen ton ruwe olie. Het kan een stad van 10.000 inwoners 20 jaar lang van stroom voorzien.'

Jörg Baumgärtner, geofysicus en projectcoördinator van het Deep Dry Rock project

Diepe warmte

Dertig jaar nadat de laatste steenkoolmijn in Heerlen sloot, riep Brussel warmtewinning uit de mijnen uit tot een Europees demonstratieproject. Heerlen werd daarvoor uitverkoren, samen met een vergelijkbaar project uit Midlothian, ten zuiden van Edinburgh. Het idee om warmte uit de Zuid-Limburgse mijnen te gebruiken voor verwarming van woonhuizen komt uit de koker van een ondernemende ambtenaar van de gemeente Heerlen: Elliane Demollin-Schneiders, die daarmee naar eigen zeggen het verleden naar de toekomst wil vertalen.

De mijnbouw bracht Heerlen veel welvaart en groei vanaf eind negentiende eeuw tot halverwege de jaren zestig van de twintigste eeuw. In die periode van voorspoed groeide Heerlen van 7.000 tot bijna 100.000 inwoners. Maar toen in 1965 minister Den Uyl van Economische Zaken aankondigde dat de mijnen gesloten moesten worden omdat steenkoolwinning onrendabel geworden was, raakte Heerlen in verval. Werkeloosheid, armoe en grootstedelijke problemen bepaalden sindsdien het imago van de stad. De laatste mijn, de Oranje Nassaumijn, sloot op 31 december 1974 de poorten waarna de mijnen zich met grondwater vulden. Met warm grondwater, realiseerde men zich dertig jaar later. En dat biedt aantrekkelijke mogelijkheden voor de stadsverwarming.

In het voorjaar van 2006 verrezen er twee boortorens middenin een Heerlense woonwijk. Oud-mijnwerkers keken met belangstelling toe hoe vanuit de torens een pijp de diepte in ging. 's Avonds werd het werk gestaakt om de buurt niet te veel overlast te bezorgen. Vier maanden later, op 9 juni 2006, was het doel bereikt: een ondergrondse gang op 700 meter diepte, waar het water een temperatuur van ruim dertig graden had. De twee putten die twee kilometer uit elkaar liggen, maken het mogelijk om water rond te pompen. Vanuit de diepte gaat het warme mijnwater naar de stadsverwarmingscentrale Heerlerheide die de warmte wint, waarna het afgekoelde water door een pijpleiding twee kilometer verder weer terugkeert naar de mijngang.

De centrale in Heerlerheide moet uiteindelijk 300 huizen en een aantal andere gebouwen van warmte én koelte gaan voorzien. De verwachting

is dat de mijn in de winter voldoende warmte biedt voor 80 procent van de vraag. De rest zal bijgestookt moeten worden. Voor de koude- en warmteopslag zijn in de loop van 2007 nog drie putten geboord, een van 450 en twee van 250 meter diep. Begin 2008 moet alles operationeel zijn. Boormanager Dick Swart heeft inmiddels het tweede Nederlandse aardwarmteproject in de planning: met tuinder Rik van de Bosch uit Bleiswijk is hij in gesprek om warm water van 60 graden op te pompen voor de verwarming van zijn tomatenkassen. Het warme water zit daar met 1750 meter wel een stuk dieper.

In Duitsland liggen de warmtedragende lagen een stuk dichter bij het oppervlak. De vele *Thermalbaden* met de bijbehorende kuurcultuur zijn daar een aanwijzing voor. Volgens Dick Swart zijn er in Duitsland al vijftig putten geboord voor warmwaterbronnen en er zijn zelfs elektriciteitscentrales waarvan de stoomturbine met aardwarmte wordt aangedreven.[128]

In Neustadt-Glewe ten noordoosten van Berlijn werd eind 2003 de eerste elektriciteit met aardwarmte opgewekt. Op 2200 meter diepte heeft het grondwater daar een temperatuur van 100 graden Celsius. Al in 1995 is die warmte aangeboord met een maximale stroomsnelheid van 33 liter per seconde. Warmtewinning heeft er prioriteit, maar wanneer er in de zomer weinig afname van warmte is, kan er ook elektriciteit gewonnen, zij het met speciale technologie. De schaal is groter dan in Heerlen: 1300 huishoudens en 22 bedrijfspanden zijn hier aangesloten op de stadsverwarming. Eerst wordt warmte onttrokken voor de verwarming en wat er dan over is, kan voor elektriciteitsopwekking gebruikt worden. Het probleem daarbij is dat het water een te lage temperatuur heeft om stoom mee te maken. Daarvoor nemen de Duitsers hun toevlucht tot een organische vloeistof met een dermate laag kookpunt dat het door het afgekoelde grondwater aan de kook gebracht kan worden. Dit procédé staat bekend onder de naam 'organische Rankine cyclus'. Aan het eind daarvan gaat het afgekoelde grondwater terug in de bodem. In de winter ligt de elektriciteitsopwekking stil, maar in de zomer draait er een 210 kilowatt generator op die een kleine 500 huishoudens van stroom kan voorzien. De Duitse milieuminister Jürgen Trittin opende de eerste geothermische centrale in november 2003. Hij vertelde bij die gelegenheid Neustadt-Glewe als demonstratieproject te zien voor veel grotere plannen. In 2050 zou 5,6 procent van de Duitse elektriciteit uit grondwarmte gewonnen moeten worden en uiteindelijk zelfs een kwart van alle Duitse elektriciteit en 35 procent van de warmte.

Nu is de prijs daar nog veel te hoog voor. De productiekosten van een kilowatt geothermische stroom uit de pilotplant bedragen 22 cent, maar dat zou op een ideale locatie 8 cent kunnen worden.

Een groter proefproject loopt sinds 1987 in de Franse Vogezen, bij het stadje Soulz, tussen Colmar en Mulhouse. Soulz is misschien het bekendst als geboorteplaats van de Franse vulkanologe Katia Krafft die samen met haar man Maurice een brandende passie had voor vulkanen en steevast overal te vinden was waar een eruptie plaatsvond. Ronduit sensationele beelden hebben ze gemaakt tot ze op 3 juni 1991 op de vulkaan Fugen in Japan noodlottig door een eruptie verrast werden. Katia Krafft zou het passend gevonden hebben dat juist haar geboorteplaats het Europese proeflab voor aardwarmte werd. Het project wordt aangeduid als 'Hot Dry Rock' en de projectcoördinator is Jörg Baumgärtner, een geofysicus van begin vijftig. In 1987 promoveerde hij op breuken in gesteenten die door een temperatuurschok teweeg gebracht waren.

Dat doet me denken aan een jeugdvakantie op het Deense eiland Bornholm. Daar mochten ik als kind graag met anderen een groot vuur stoken op een van de talrijke granietrotsen, die als mini-eilandjes voor de kust lagen. De truc was daarbij om het vuur vlak tegen een rotsvlak aan te leggen. Aan het eind van de avond, wanneer de rots flink heet gestookt was, gooiden we dan een emmer zeewater tegen het graniet en als je geluk had, dan barstte het massieve blok. Intens tevreden gingen we dan naar bed.

Wat het team van Jörg Baumgärtner op kilometers diepte bij Soulz doet, is in wezen niets anders. Hij brengt koud water via een boorpijp in het hete (150 tot 200 graden) gesteente om het te breken om het zo beter doorgankelijk te maken voor water. Natuurlijk helpt het daarbij om in een gebied te zitten waar al natuurlijke breukzones zijn. Tot 1997 werden de eerste experimenten gedaan op 3600 meter diepte waar de temperatuur 150 graden bedraagt. In 1998 werd voor het eerst 5000 meter diepte bereikt (temperatuur meer dan 200 graden), waarna er breukzones geforceerd werden. In de periode tot 2004 werden er vanuit dezelfde boortoren scheef twee andere gaten geboord op enige afstand van de eerste en ook daar werd het gesteente doorgankelijk gemaakt. Via het middelste gat kan nu water in de grond gepompt worden, dat er via de beide zijgaten als stoom weer uitkomt. De stoom drijft een turbine aan, waarmee 1,5 megawatt aan elektriciteit wordt opgewekt. Uiteindelijk denkt het team het vermogen tot 6 megawatt op te kunnen voeren door gebruik te maken van ondergrondse heetwaterpompen.

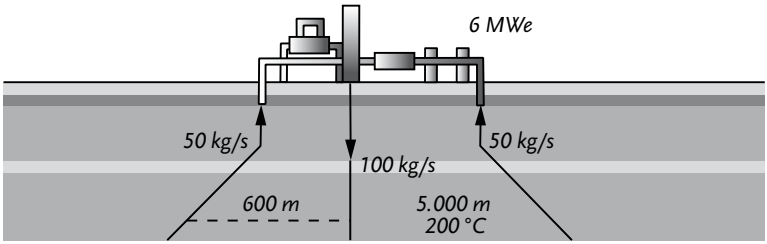

FIG.61 Schematische opstelling van de geothermische centrale in Soultz.

Het potentieel aan aardwarmte is gigantisch, zo betoogt Baumgärtner tijdens een Europese energiepresentatie. De warmte-inhoud van een kubieke kilometer steen die van 200 naar 180 graden afkoelt zou even groot zijn als die van een miljoen ton ruwe olie. Het zou een stad van 10.000 inwoners twintig jaar lang van stroom kunnen voorzien. En als het blok steen teveel afgekoeld is, boor je een paar kilometer verderop een stel nieuwe gaten en het feest begint opnieuw terwijl de oude bron weer langzaam op temperatuur kan komen. Baumgärtner schat dat een bron tien tot twintig jaar warmte kan leveren, maar duurtests moeten dat nu uitwijzen.

Volgens warmtekaarten ligt het grootste potentieel aan aardwarmte in Centraal- en Oost-Europa (Duitsland, Frankrijk, Balkan, Noord-Italië en Turkije). In totaal is er 125.000 vierkante kilometer waar de temperatuur op vijf kilometer diepte meer dan 200 graden bedraagt, en dat is een werkbare temperatuur om stoom mee op te wekken.

Het Internationaal Energieagentschap IEA ziet geothermische elektriciteit als een middenmoter: wereldwijd 0,6 procent in 2030.[129] Dat is acht keer meer dan golf- en getijde-energie en acht keer minder dan wind in 2030. Het gebruik van geothermische energie als warmte staat daar los van.

De absolute kampioen op het gebied van aardwarmte is IJsland, het land van de geisers. Dat begon al met de kolonisatie door Ingolfúr Arnarson, een uit Noorwegen verdreven hoofdman die zich samen met zijn getrouwen in het jaar 874 op IJsland vestigde. Vanuit de vikingschepen waren boven het land stoompluimen zichtbaar, die de bemanning opvatte als rook. Het schiereiland noemden ze daarom 'rokend schiereiland' of Reykjanes. De plek waar Arnarson aan land ging, volgens de legende bepaald door het aanspoelen van twee overboord gezette bewerkte houten pilaren, noemde hij Reykjavik, of 'rokerige baai'. De ge-

neugten van warm water in het barre klimaat werden al snel ontdekt en vanaf de vroegste geschiedenis tot aan het begin van de twintigste eeuw gebruikten huisvrouwen de warme bronnen van Reykjavik voor hun was. Een van de eerste en bekendste baden is van de dichter Snorri Sturlurson, die rond 1200 graag in zijn ronde stenen bad buiten mocht zitten, wachtend op inspiratie. De eerste pogingen om huizen met het alom aanwezige warme water te verwarmen dateren van het midden van de achttiende eeuw. Een school in Reykjavik was in november 1930 het eerste gebouw dat aardwarmte kreeg. Daarna volgden er nog tal van openbare gebouwen en allengs ook steeds meer woonhuizen. Vandaag voorziet de stadsverwarming van Reykjavik alle 113.850 inwoners in 35.000 huizen van sterk naar zwavel ruikend warm water en centrale verwarming. De warmte is er zo goedkoop dat 's winters soms zelfs de trottoirs verwarmd worden. Goedkoper dan pekel strooien kennelijk. In totaal komt 87 procent van alle warmte in IJsland uit de bodem. Daarnaast voorzien vijf geothermische elektriciteitscentrales in ongeveer 17 procent van de stroom. De overige 83 procent komt van waterkrachtcentrales en slechts 0,06 procent van fossiele brandstoffen.[130]

Het geheim van deze bijzondere energiemix is uiteraard de bijzondere ligging van IJsland, bovenop het Mid-Atlantisch rif. Een band van tientallen hotspots ligt op een diagonale band van zuidwest naar noordoost over het eiland verspreid.

Je zou kunnen denken dat IJsland op zijn warme lauweren kan gaan rusten, maar dat is niet het geval. IJsland wil zijn natuurlijke hulpbronnen maximaal benutten en daarvoor is nu een zeer gedurfd plan in de maak: het *Iceland Deep Drilling Project* of IDDP.

De meeste geothermische installaties boren lagen aan waar de temperaturen onder de grond tussen 200 en 350 graden Celsius zijn. Een mix van water en stoom komt daaruit naar boven. De stoom wordt eerst gebruikt om een turbine mee aan te drijven, waarna uit de condensatie warmte vrijkomt. Het hete water wordt uitsluitend voor de warmte gebruikt.

Maar geoloog Gudmundur Omar Fridleifson en Albert Albertsson van het energiebedrijf *Sudurnes Regional Heating* ontwikkelden enkele jaren geleden een gedurfd plan. Wat zou er gebeuren, vroegen zij zich af, als je dieper naar de kern zou boren, naar waterlagen die zich net boven het magma bevinden. Het water is daar hels, zoveel wisten ze al wel. Water boven de 374 graden Celsius en bij een druk van 200 atmosfeer of meer, krijgt zeer bijzondere eigenschappen. Het komt in een

zogenaamde superkritische toestand. Dat is een merkwaardige en zeer energiedichte toestand waarbij water een dichtheid krijgt die tussen water en stoom in ligt, met het doordringingsvermogen van een gas, maar de intensiteit van een vloeistof. Daar komt nog bij dat zouten opeens heel slecht oplossen en organische moleculen heel goed. Eén keer is het voorgekomen dat men bij het boren in IJsland op superkritisch water stuitte. Dat was in 1985 in Nesjavellir, net buiten Reykjavik. De put moest toen met 600 meter puin gedicht worden om een *blow-out* te voorkomen, dat wil zeggen: een ontembare stoompluim die onder het boorplatform zou losbreken. Fridleifson en Albertsson wisten dus dat het een wild beest was dat ze wilden temmen, maar ze wisten ook dat de energie-inhoud van superkritische stoom tien keer hoger ligt dan die van gewone stoom.

Op het *World Geothermal Congress* van 2000 in Japan brachten ze hun gewaagde plan naar voren en sindsdien zijn haalbaarheidsstudies uitgevoerd die aangeven dat superkritisch boren in principe mogelijk moet zijn. Het IJslandse duo schat 3500 meter diep te moeten boren, waar ze een temperatuur van 600 graden denken aan te treffen. De boorkosten worden geschat op 10 miljoen dollar. Op de site van het project worden boorfirma's uitgenodigd een offerte uit te brengen. Als locatie is de Krafla-vulkaan in Noord-IJsland gekozen, een plek die de NASA graag gebruikt om Marsvoertuigen te testen vanwege de landschappelijke overeenkomst met de rode zusterplaneet. In 2008 zou het gat geboord moeten gaan worden.

'Als we superkritisch water om kunnen zetten naar oververhitte stoom, dan kan het feest beginnen,' zegt Fridleifson tegen *New Scientist*, 'want aan stoom zijn we gewend.'[131] Met dit verschil dat een 2 kilogram stoom per seconde ongeveer één megawatt aan stroom opwekt, en 2 kilogram superkritische stoom in principe 10 megawatt. Met het energie-overschot dat daarmee ontstaat, kan IJsland de hele vissersvloot en uiteindelijk het hele land op waterstof laten draaien. Het is niet voor niets dat 's werelds eerste waterstoftankstation in april 2003 uitgerekend in Reykjavik geopend werd. Als de waterstofeconomie ergens een kans heeft, dan is het wel in IJsland.

Maar superkritisch water heeft nog meer mogelijkheden: het kan waterstof winnen uit biomassa en volgens Dan Fraser van de Universiteit van Manitoba kan waterstof met kooldioxide omgezet worden in methanol, dat eenvoudig verscheept kan worden. IJsland zou zo een energie-exporteur van formaat kunnen worden.

Maar daarmee houdt het nog niet op. Dan Fraser schat de kans groot dat het superkritische water zeer rijk zal zijn aan mineralen en ertsen. Zodra het water in een normale toestand terugkeert, zullen de ertsen naar verwachting neerslaan. 'Als je superkritisch boort, dan kon het hele periodiek systeem wel eens naar boven komen. Derdewereldlanden kunnen dan opeens een enorme rijkdom aan goud, zilver, koper en zink blijken te hebben,' aldus Fraser in *New Scientist*.

Het IDDP is een spannende expeditie geworden met kansen op grootse beloningen voor wie het monster weet te temmen. Manager Fridleifson blijft er nuchter onder. Eerst maar eens zien of ze veilig dat gat kunnen boren.

Zie ginds komt de stroomboot

In IJsland is er elektriciteit in overvloed, bij ons wordt de stroom steeds duurder. Een Hollandse handelsgeest gaat dan op zoek naar mogelijkheden om stroom vanuit IJsland te importeren. Een kabel is denkbaar, die komt er ook naar Noorwegen, maar wel onpraktisch vanwege een diepe zeetrog onderweg. Twee TNO-ingenieurs bedachten in 2003 een originele oplossing: de stroomboot.

Petra de Boer en Janita de Meij (TNO, Milieu, Energie en Procesinnovatie) kregen die *brainwave* op een klassieke plaats: bij het koffieapparaat. Zelf waren ze betrokken bij de ontwikkeling van een superbatterij toen een collega vertelde over een documentaire die hij had gezien over de overvloedige aardwarmte in IJsland. De Boer en De Meij keken elkaar aan en dachten hetzelfde: een schip kon de opgeladen chemicaliën voor de superbatterij vanuit IJsland vervoeren.

De superbatterij of *flow battery* slaat, net als een accu, stroom op in een omkeerbaar chemisch proces. Maar anders dan een accu is een *flow battery* of *flow cell* geen gesloten systeem. De opgeladen chemicaliën worden in tanks opgeslagen en houden hun energie vast tot ze weer bijeen gebracht worden (zie voor een uitgebreidere beschrijving het hoofdstuk Waterstof op wielen).

Volgens berekeningen van TNO wordt een stroomboot rendabel bij een chemische energiedichtheid van 80 wattuur per kilogram en een stroomprijs van meer dan 165 euro per megawattuur. Zo hoog komt de stroomprijs op de beurs alleen kortstondig als de vraag het aanbod fors overtreft.

Meestal echter ligt de stroomprijs een stuk lager. Verder is de huidige energiedichtheid van 17 wattuur per kilogram vier keer lager dan de ondergrens volgens TNO.

Voorlopig is de stroomboot dus nog niet in zicht. Als er wel een energieveerdienst komt, zal het vooral een voorziening zijn om pieken in de stroomvraag op te vangen.

Terug in Nederland zijn de vooruitzichten voor aardwarmte minder spectaculair, maar wel aanwezig. Onze waterrijke bodem leent zich het best voor opslag van warmte en koude, en minder voor het onttrekken van aardwarmte aan de bodem. Maar ook opslag kan erg rendabel zijn. In een *special* maakt het blad *De Ingenieur* een inventarisatie van bijzondere projecten op dat gebied: het Deventer Ziekenhuis maakt van warmte- en koude-opslag gebruik en bespaart daarmee 75 procent aan aardgas uit en 40 procent op de totale energie. In Kaatsheuvel wordt een groep huizen uitgerust met een warmtebuffer 100 meter onder de grond. Warmtepompen onttrekken er in de winter de warmte aan, wat naar schatting de helft van de stookkosten bespaart.[132]

Ook het huis van burgemeester Jorritsma in Almere is met een diepliggende warmtebuffer uitgerust. Alleen viel dat niet bij iedereen in goede aarde, want Jorritsma had verzuimd een vergunning aan te vragen voor de boring. Bovendien was de boring dwars door een laag met hoogwaardig drinkwater heen gegaan, die de provincie Flevoland als 'strategische voorraad' beschouwt. Jorritsma had die laag mogelijk beschadigd doordat er zout water of bacteriën vanuit andere lagen in terecht zouden kunnen komen. Eind december 2006 was de situatie zo dat de provincie eiste dat Jorritsma geen grondwater meer op zou pompen en zo nodig de schade zou herstellen. Als dat al mogelijk zou zijn. Jorritsma voelde daar niets voor en kondigde in de *NRC* aan een besluit tot stopzetting aan te zullen vechten.[133]

In Nederland geen granieten bodem, verzengende temperaturen of helse brouwsels op kilometers onder de aarde, maar een beetje zompige poldervariatie op de aardwarmte. Procedureel niet in orde en milieutechnisch roekeloos, maar wel gebaseerd op een nuchtere inschatting. Namelijk dat een ondergrondse warmtebuffer de stookkosten zo ongeveer halveert. Dat zouden meer mensen moeten doen, maar dan wel met een keurige vergunning natuurlijk.

Stroom uit water

FIG.62 Deiningsturbine Archimedes Wave Swing. - Bron: AWS ocean energy Ltd.

'Toen de Brits-Ierse toneelschrijver George Bernard Shaw (1856-1950) in de jaren twintig van de vorige eeuw Orkney bezocht zag hij het geweld van het water en stelde dat er genoeg energie in de Pentland Firth (tussen Schotland en Orkney) was om heel Europa van elektriciteit te voorzien.'

(Ruud Hisgen en Remi Laane in Geheimen van de zoute zee, Veen Magazines, 2006)

Eindeloze deining

In een hal van metaaldraaierij Lommers aan de rand van Purmerend ligt een gedemonteerde waterturbine. Een compacte ronde kap met twee stompe bladen van anderhalve meter lang op een knalrode cilinder van een meter dik en drie meter lang. Er bovenop een flens waar kabels uitsteken en een ventilatieslang. Alles ademt de stoere onverwoestbaarheid van maritieme techniek. En dat is geen toeval want het metaalbedrijf Lommers is begonnen met werk voor de offshore en met baggerpompen. In de hal ernaast ligt er één in aanbouw: een gigantisch slakkenhuis van zeven meter doorsnee. Het is het pomphuis voor een baggerpomp. Er komen schoepen in die het gruis van de baggermolen moeten verpompen. Geen kleinigheid zoiets te bouwen. 'Bovendien,' vertelt directeur Nico Lommers, zoon van de oprichter, 'is de binnenkant van het pomphuis van keihard metaal. Dat moet wel, want de pomp krijgt enorme hoeveelheden zand, kiezels en brokken steen voor de kiezen. De schoepen worden iets minder hard, zodat die eerder slijten dan het huis.' Nico Lommers, een lange vent in spijkerbroek en houthakkershirt, leidt me door het bedrijf waar mannen in blauwe overalls lassen, draaien en frezen aan enorme stalen constructies. Na een aantal flauwe jaren pikt nu het werk in de offshore weer op, vertelt hij. Productie op de Noordzee is door de gestegen olieprijzen plotseling weer interessant geworden, en dat is merkbaar in Purmerend.

FIG.63 Nico Lommers en Fred Gardner bij het prototype waterturbine. – Foto: JW

Ontwerper van de waterturbine is Fred Gardner (50), rond gezicht, sluik grijzend haar en een blauw overhemd onder zijn trui. Gardner is ondernemer en uitvinder in de groene energie. Hij ontwierp naast de waterturbine ook een gigantische dobber voor golfenergie en hij exporteert kleine blauwe windmolens naar het ontwerp van de Nederlandse windpionier Henk Lagerweij. Gardner deed HTS elektrotechniek en werktuigbouwkunde en stond daarna een tijd voor de klas. Maar wat hij nu doet, in samenwerking met andere specialisten duurzame energieprojecten opzetten, dat doet hij het liefst. 'Het leukst is toch de innovatie, samenwerken met goede mensen.' Dat is ook de bedrijfsfilosofie van zijn onderneming Teamwork Technologies, waar een klein aantal specialisten op freelancebasis samenwerkt in een voormalige veestal in Noord-Holland.

De waterturbine heeft in 2006 proefgedraaid achter de spuisluizen bij Den Oever, aan de westkant van de Afsluitdijk. Het water van het IJsselmeer stroomt daar bij laag water met een snelheid van 3 tot 4 meter per seconde in de Waddenzee. In overleg met Nico Lommers ontwierp en bouwde Gardner een zwaar buizenframe waaraan de turbine neergelaten kon worden in de stroming. De geringe diepte beperkte de afmetingen van de turbinebladen tot 2,8 meter. Daarmee was het mogelijk om de gehele turbine onder water te laten draaien op veilige afstand van de bodem. Het geheel werkte en leverde conform berekening zo'n 35 kilowatt, genoeg voor een kleine negentig huishoudens. Het vermogen hangt natuurlijk af van de stroomsnelheid en boven de 4,2 meter per seconde is het volgens Gardner vooral een kwestie van overleven. De kolken die er dan ontstaan, wrikken op een vreselijke manier aan de schoepen en aan de as. In het volgende ontwerp is de tandwielkast dan ook vervallen en is gekozen voor een directe aandrijving van de generator. Een tandwielkast, hoe degelijk ook, is op den duur niet bestand tegen de kolkende krachten van het water. 'Dat geeft een hele rare asbelasting.' De volgende stap is een vereenvoudigd ontwerp met een direct drive generator (zonder tandwieloverbrenging) en dezelfde diameter. Die turbine moet tien jaar lang als demo draaien in de spuisluis van Den Oever.

Op mijn vraag of zoiets niet interessant is voor het Marsdiep, slaat Gardner de ogen ten hemel. Ik weet uit stroomatlassen dat het Marsdiep tussen Den Helder en Texel een enorm diep gat is en dat een groot deel van de Waddenzee tweemaal daags via dit gat vol en weer leeg loopt. De energie die hier langstrekt lijkt me gigantisch. Maar Gardner weet

hoeveel vergunningen er nodig zijn voor zelfs een beperkt experiment als bij Den Oever. Onder druk van ongeruste natuurorganisaties heeft Gardner naar eigen zeggen de duurste vissen van Nederland gevangen. Men was ongerust dat vissen vanuit het IJsselmeer in een soort shredder terecht zouden komen en verhakseld de Waddenzee zouden bereiken. Om na te gaan of dat zo was heeft Gardner visnetten moeten opstellen om het effect van de turbine op de visstand te controleren. Toen bleek dat er heel weinig vissen door de spuisluis gaan, onafhankelijk van de turbine. De gedachte aan de voorschriften rondom het Marsdiep, een drukke scheepvaartroute en uitvalsbasis van de Nederlandse Marine, is voor Gardner reden genoeg om zich tot kleine uitstroomgaten te beperken. Bij het IJsselmeer, maar ook vanuit Zeeland is er belangstelling. 'De helft van de projectkosten zijn opgegaan aan denkbeeldige milieubezwaren,' vertelt hij. 'Men zegt duurzame energie te willen stimuleren, maar de regelgeving is knellend.'

In totaal schat Gardner de capaciteit van stromingsturbines is Nederland op 100 megawatt. Op het geheel van circa 20.000 megawatt elektrisch vermogen is dat zeer beperkt (0,5 procent). Maar daar hoeft niet bij te blijven wat Gardner en Lommers betreft. 'Vanuit Den Helder kunnen we turbines over de hele wereld verschepen.'

De zee als zonnecollector

Meer dan tweederde van het aardoppervlak is zee. Op een gemiddelde dag nemen de oceanen net zoveel warmte op van de zon als de energie-inhoud van 250 miljard vaten olie. Als een tiende procent daarvan in stroom omgezet zou kunnen worden, is dat 24 keer meer dan het Europese elektriciteitsverbruik in een dag.

De techniek om warmte van de oceanen om te zetten in elektriciteit heet *Ocean Thermal Energy Conversion*, kortweg OTEC. De techniek werkt op het temperatuurverschil tussen oppervlaktewater en het water op grote, 500 tot 1000 meter, diepte. Het temperatuurverschil moet zo'n 20 graden bedragen. Dat maakt de techniek alleen bruikbaar in een band rond de evenaar met de beste vooruitzichten in de Stille Oceaan en iets minder in de Atlantische Oceaan ten oosten van Zuid-Amerika.

Warm en koud zeewater worden opgepompt. Het temperatuurverschil daartussen wordt benut om beweging mee op te wekken. Dat kan op verschillende manieren, maar de twee belangrijkste methoden heten open en gesloten cyclus. Bij de gesloten cyclus gebruikt men een vloeistof met een laag kookpunt, bijvoorbeeld ammonia of freon (bekend uit de koelkast). Die vloeistof brengt men aan de kook met de warmte van het zeewater waardoor stoom ontstaat die een turbine aandrijft waaraan een generator gekoppeld wordt. De vloeistof koelt af via een warmtewisselaar met koud zeewater.

Bij de open cyclus laat men het warme zeewater zelf verdampen door het in een ruimte met onderdruk te brengen. Hierdoor verlaagt het kookpunt en er ontstaat wederom stoom voor de turbine. Het rendement van het proces is groter naarmate het temperatuurverschil tussen warm en koud groter is.

FIG.64 Links: pijpen voor een OTEC-installatie. Rechts: het Indiase OTEC-schip. – Foto's: Wikipedia

Het proces klinkt geavanceerd, maar het werd al in 1881 bedacht door de Franse fysicus Jacques Arsène d'Arsonval. Een student van hem, Georges Claude, bouwde al in 1930 een eerste open systeem voor de kust van Cuba. Met tussenpozen zijn vooral door Franse, Amerikaanse, Japanse en sinds kort ook Indiase ingenieurs steeds weer nieuwe en grotere OTEC's gebouwd. Soms aan de kust, maar ook op schepen.

In 1993 vestigden de Amerikanen een record met een 50 kilowatt installatie op Keahole Point in Hawaï. In 2000 bouwden Indiase ingenieurs een 1 megawatt installatie op een schip. Volgens deskundigen zijn de opwekkingskosten met 5 eurocent per kilowatt vergelijkbaar met windenergie.

Voor Nederland, met zijn koude en ondiepe (gemiddeld 40 meter) Noordzee, is OTEC helaas geen optie.

Voor zijn andere project, de Archimedes Wave Swing (AWS), is Fred Gardner geheel op het buitenland aangewezen. In 2005 heeft een prototype proefgedraaid voor de kust van Portugal. In zijn kantoor in Zijdewind (Noord-Holland) staat er een maquette van. Het stelt een drijvend platform voor van 37 bij 50 meter met in het midden een kooi waarin een enorme omgekeerde cilinder gevangen zit. De echte cilinder heeft een diameter van 10 meter en is 25 meter hoog.

FIG.65 De Archimedes Wave Swing vangt de deining op onderwater.
- Artist Impression: AWSocean energy ltd.

Daarbinnen zit nog een cilinder en die twee kunnen langs elkaar bewegen. De onderste cilinder zit verankerd aan de zeebodem, de andere, die met lucht gevuld is, zweeft er boven maar blijft wel onder het wateroppervlak. De bovenste cilinder beweegt onder water mee met de golven aan de oppervlakte doordat de golfhoogte een drukverschil in de waterkolom veroorzaakt. Het geheel is zo uitgerekend dat de dobber onder water in resonantie komt door de oceaangolven. Daardoor kan de Wave Swing bij een golfhoogte van anderhalve meter een uitslag van negen meter bereiken. De kolossale beschuitbus rijdt dan via rails op en neer, waarbij magneten langs spoelen in het binnenste van de cilinder razen. De constructie is zo eenvoudig mogelijk met maar één bewegend onderdeel: de drijver. De uitslag daarvan kan met kleppen in een hydraulisch systeem gedempt worden om beschadiging bij ruwe zee te voorkomen. Tijdens de proef heeft de lineaire generator maximaal 2 megawatt geleverd en een totale energie van 3,5 gigawattuur (ruim 200 dagen op 35 procent van de topcapaciteit).

Het Schotse bedrijf AWS Ocean Energy is betrokken bij de volgende stap: de ontwikkeling van een ranke opvolger die in 2008 voor de kust van Orkney geplaatst moet gaan worden. Daarna is het de bedoeling dat

er op die plek het eerste park ingericht wordt met golfgenerators. En die plek is niet toevallig gekozen. Al in Noorse mythes wordt het kolkende zeegat tussen Orkney en Schotland genoemd. Twee sterke slavinnen Fenja en Menja zouden er onder de golven onophoudelijk malen aan hun zoutmolen Grotti, die door de roofzuchtige Viking Mysing gestolen was. Zijn schip verging, maar de slavinnen maalden door en zo zou het malende zeegat tussen Schotland en Orkney zijn ontstaan.[134]

In recentere tijden raakte de Iers-Engelse schrijver George Bernard Shaw (1856–1950) onder de indruk van het heersende natuurgeweld. Hij schatte dat hieruit heel Europa wel van elektriciteit kon worden voorzien. Dat lijkt een dichterlijke overdrijving, maar een halve eeuw later zijn de eerste pogingen begonnen om het enorme natuurgeweld te beteugelen. Het bedrijf AWS Ocean Energy vermeldt zijn plannen op de site: 'Met een continu vermogen van 1,2 megawatt in een ruige zee en een jaarlijkse energieproductie van 4000 megawattuur op een Noord-Atlantische locatie, is de Archimedes Wave Swing een generator van formaat. Omstreeks 2009 leveren AWS-turbines schone en betrouwbare energie aan gebruikers in verschillende landen, waaronder Engeland en Portugal. Binnen tien jaar zal onze technologie door grote energieproducenten over de hele wereld ingezet worden en binnen 20 jaar zullen AWS generators een aanzienlijke bijdrage leveren aan de globale energievoorziening.'

Of het zo hard zal gaan, is afwachten. Maar qua vermogen is de AWS vergelijkbaar met een moderne windturbine en die markt groeit met 20 tot 30 procent per jaar. Helemaal onvoorstelbaar is het optimistische scenario dus niet. Bovendien wordt het potentieel aan golfenergie geschat op één tot twee miljoen megawatt, of omstreeks 10 procent van het wereldelektriciteitsverbruik.[135]

In Nederland zullen we er weinig van merken, omdat de golfslag hier te gering is. Een AWS werkt het best bij de trage lange golven van de Atlantische Oceaan met een golflengte van 150 tot 300 meter. Het geklots bij ons aan de kust is daarvoor niet indrukwekkend genoeg. Toch is ook daar energie uit te halen.

In Denemarken werd in mei 2003 voor het eerst stroom geleverd, afkomstig uit golven voor de kust. Zes knalrode krabachtige stalen constructies die in het Lymfjord een eindje uit de kust dreven, hadden de aanrollende golven omgezet in elektriciteit. Het waren de prototypen van de zogenaamde Wave Dragon.

FIG.66 Golven slaan over de Wave Dragon. – Foto: EU, directoraat onderzoek

De Wave Dragon is naar een idee van de pijprokende ingenieur Friis Madsen uitgevoerd onder leiding van Hans Christian Sorensen, een ingenieur met MBA die er een bedrijf voor heeft opgericht. Het principe is eenvoudig, en dat is vaak het beste onder maritieme omstandigheden. De hele constructie drijft en is met ankers vastgezet. Van boven gezien heeft de Wave Dragon een vorm van een C met in het midden het centrale eiland en twee wijde armen (totale breedte 58 meter in het prototype) die de aankomende golven moeten opvangen en opstuwen. Naarmate de golf verder naar binnen loopt, wordt de ruimte steeds smaller waardoor een aanrollende golf maximaal opgestuwd wordt voor als-ie tegen de helling van het centrale deel aanloopt en daar over de rand slaat. Het water komt dan in een vlak reservoir terecht vanwaar het door een aantal gaten met schoepenraderen en generatoren terugloopt in zee. Het terugstromende water levert in het prototype een maximaal vermogen van 20 kilowatt. Door het jaar heen leverde het prototype 22 procent van het maximale vermogen. Duurtests vanaf 2003 hebben volgens de Universiteit van Aalborg uitgewezen dat de Wave Dragon 18 procent van de golfenergie omzet in elektriciteit. De ontwikkelaars mikten op 21 procent en zijn blij dat ze er met hun prototype zo dichtbij zitten.

Uiteindelijk moet de Wave Dragon 4,5 maal groter worden: 300 meter wijd, 170 meter diep en 33 ton zwaar. Dan is het maximale vermogen

7 megawatt. Zo'n monster wordt nu met Europese gelden als demonstratiemodel ontwikkeld voor de kust van Wales. In 2008 moet-ie daar drijven. Verder is het bedrijf Wave Dragon ApS uit Kopenhagen betrokken bij het ontwerp van een 50 megawatt golfcentrale voor de kust van Portugal. Men is daar nu op zoek naar geïnteresseerde energiebedrijven en naar scheepswerven die de units kunnen bouwen. De Denen hopen op een herhaling van de successtory van de windenergie en ze zetten in op 2400 megawatt golfenergie in 2016. De productiekosten van een kilowattuur moeten dan gedaald zijn tot 4 eurocent, wat vergelijkbaar is met de kosten van windenergie.

Wave rotor

Op de video is een golfbad te zien. Drie vinnen draaien rondjes door de golven, net boven de waterspiegel. Het lijkt wel alsof er een grote mixer is aangebracht die het water klutst. Maar de situatie is net omgekeerd: het zijn de golven die een rotor aandrijven. En dat biedt interessante mogelijkheden.

De zogenaamde Wave Rotor is een bedenksel van Peter Scheijgrond, een forse blonde vent met het halflange haar achter zijn oren. Op zijn kantoor bij Ecofys Nederland bv in Utrecht laat hij zien hoe de rotor werkt. 'Mensen denken dat water in golven alleen op en neer gaat,' zegt Scheijgrond. 'Maar als je goed kijkt naar een kurk die op golvend water ligt, dan zie je dat die kleine rondjes maakt.' Op het computerscherm verschijnt een animatie die laat zien hoe waterdeeltjes bewegen als een golf voorbij komt: naar voren, omlaag, naar achter en weer omhoog. Inderdaad een kringetje. Hoe dieper onder het oppervlak, hoe kleiner het kringetje

De Wave Rotor is zo ontworpen dat hij de periodieke cirkelbeweging van het water opvangt en omzet in een voortstuwende kracht op de rotorbladen. Scheijgrond ging uit van schuin staande rotorbladen, toen iemand hem attent maakte op een soortgelijk project uit Denemarken. Eric Rossen was daar bezig met een rotor met horizontale bladen. Nu werken ze samen aan een rotor die drie schuine en drie horizontale bladen heeft. Dat levert niet alleen een dubbele voortstuwing op, het is constructief ook steviger.

FIG.67 Tekening van Wave Rotor. - Bron: Econcern

De video bewijst het principe, nu is het een kwestie van opschalen. In de zomer van 2007 wordt een model getest in de Westerschelde, vlak voor de kerncentrale van Borssele. Leuke PR-activiteit. Met 2,5 meter doorsnede zal die rotor gemiddeld 5 kilowatt leveren, verwachten de onderzoekers. Daarna zal een grotere uitvoering getest worden bij een gasplatform op de Noordzee voor de stroomvoorziening op het werkeiland.

Uiteindelijk zou een Wave Rotor in de Noordzee met 10 meter doorsnede gemiddeld 50 kilowatt op moeten leveren. Nu staan er voor de Nederlandse kust staan nauwelijks golven (een vermogen van 4 kilowatt per meter). In Denemarken wordt dat al beter (16 kilowatt/meter), maar interessant wordt de deining pas bij Zuid-Engeland, voor de kust van Portugal of Schotland (40 – 80 kilowatt/meter). Daar zou eenzelfde Wave Rotor dus wel een halve megawatt op kunnen wekken.

Op het promotieplaatje is de rotor om de mast van een windturbine aangebracht. Is dat het einddoel? Scheijgrond lacht een beetje. 'In het algemeen bouwen ze niet graag windturbines op onze favoriete plekken met hoge golven. Maar het geeft wel een goed beeld van waar het in de toekomst naar toe kan gaan.'

De eindeloze deining van de zee is de inspiratiebron geweest van tal van andere golfgeneratoren. Op de Orkney eilanden, ten noorden van Schot-

land, is zelfs een testcentrum in gericht, het *European Marine Energy Centre* of EMEC, waar systemen systematisch en over langere tijd getest kunnen worden in ruig water. Eén van de golfgeneratoren die daar getest is, bestaat uit vijf aan elkaar verbonden pijpen, die drijven op de golven. De pijpen van het zogenaamde *Pelamis*-systeem zijn 3,5 meter dik en ongeveer 30 meter lang. De onderlinge beweging veroorzaakt via koppelingen een hydraulische druk in de cilinders. Die hydraulica drijft een generator aan die stroom produceert. Het maximale vermogen bedraagt 750 kilowatt. De ketting van pijpdelen is aan beide uiteinden verankerd en een stroomkabel loopt via een anker naar de wal.

Een ander ontwerp bestaat uit een holle verankerde boei met bovenin een luchtgat en een ventilator. Deining veroorzaakt een op-en-neergaande vloeistofkolom in de boei en een in-en-uitgaande luchtstroom door het ventilatiegat. De firma die de zuchtende boei heeft ontworpen heet Wavegen, die eerder de Osprey maakte. Die maakte ook gebruik van een door water aangedreven luchtkolom, maar de Osprey was bevestigd aan de kust. Dat maakte de constructie vooral tijdens de bouw erg kwetsbaar. Vandaar nu de keuze voor een eenvoudige geankerde boei.

De ontwikkeling van golf- en stroomenergie is, zeker in vergelijking met windenergie, nog maar net begonnen. Windmolens zijn in de loop van dertig jaar hoogefficiënte high-tech turbines geworden. Bij golfenergie is er nog groot scala aan probeersels waar in de loop van de tijd waarschijnlijk enkele winnende ontwerpen uit naar voren zullen komen. De praktijktest is uiteindelijk de enige toetssteen.

Waterstroom

De perspex proefopstelling staat op een laboratoriumtafel in een hal van Wetsus, het instituut voor duurzame natte technologie in Leeuwarden. Promovendus Jan Post (late twintiger, streepjesoverhemd en een middenscheiding in het blonde haar) schenkt behoedzaam twee kannen water in de reservoirs bovenin de opstelling. Eén met kraanwater, de ander met zout water. Hij draait onderin twee kraantjes open waardoor het water vanuit de reservoirs langzaam leegloopt in de bakken eronder.

'Kijk naar de voltmeter,' wijst Post aan. 'Als het water eenmaal door de cel gelopen is, begint de spanningsopbouw.' En inderdaad: enkele seconden later komt de voltmeter tot leven en de aanwijzing klimt tot 4 volt. Een klein elektromotortje begint te draaien en een gekleurd schijfje draait mee. De demonstratie werkt. Uit het concentratieverschil tussen zout en zoet water is stroom op te wekken: waterstroom. Hier spreekt men van 'Blue Energy', een CO_2-vrije energiebron die uitgelezen mogelijkheden zou bieden voor Nederland waar per seconde meer dan drieduizend kubieke meter zoet rivierwater in in de zoute zee stroomt.

Voorvechters van 'Blue Energy' hebben het over een potentieel van 3300 megawatt aan stille duurzame waterstroom. Voorlopig lijkt dat nog ver weg, maar tien jaar geleden zag ik een soortgelijke demonstratieopstelling van de brandstofcel bij ECN. Nu rijdt daar een demo-wagentje over het terrein en diverse autofabrikanten werken aan auto's met brandstofcellen. Ik wil maar zeggen: in tien jaar van laboratorium naar prototype is best mogelijk.

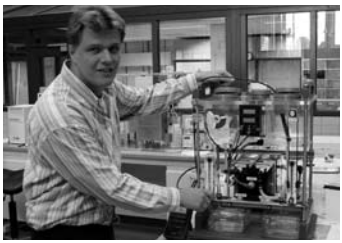

FIG.68 Jan Post bij de proefopstelling van Wetsus. – Foto: JW

Ik hoorde er twee jaar geleden voor het eerst over. Op de zogeheten klimaatdag 'Europa in de Broeikas?' in Maarssen over klimatologische bedreigingen en technologische innovaties. Daar werd ik aangesproken door Gerrit Oudakker, technologiescout bij het bouwconcern Volker Wessels. Hij had op mijn badge gezien dat ik voor de omroep werkte en zei: 'Hier moeten jullie eens wat over doen.' Blauwe blazer, grijze broek, grijs haar. Een jongensachtige beweeglijkheid en twinkelende ogen achter het kleine brilletje. Hij vertelde me over het concept, dat je stroom kon genereren uit de combinatie van zout en zoet water. Hij liet me een foto zien van de demonstratieopstelling die hij had laten bouwen. Hetzelfde apparaat dat ik later bij Wetsus in het echt zou zien. Aanvankelijk had ik moeite zijn verhaal serieus te nemen, maar aan het eind van de dag was de zogenaamde 'Blue Energy' me wel het meest bijgebleven.

Ik besloot er eens achteraan te bellen. Het spoor leidde al gauw naar Josien Krijgsman, onderzoekster bij het Arnhemse elektriciteitsexpertisebedrijf Kema. Zij deed onderzoek naar de membranen die geschikt zijn voor de elektriciteitsopwekking uit concentratieverschillen. Zulke membranen vervullen een sleutelrol bij het Bue Energy-project. Ze maken het mogelijk om positieve ionen de ene kant op te laten stromen en negatieve de andere. Dat betekent een netto elektrische stroom door de cel.[136]

De ontdekking van ionendoorlatende membranen was een toevalsvinding. Kema deed tien jaar eerder onderzoek naar de achteruitgang van de isolatie van elektriciteitskabels. Vooral in vochtige en zoute bodems bleek de isolatiemantel van polyethyleen aangetast te worden: er ontstonden kleine kanaaltjes in het polymeer waarin ionen konden doordringen. Dat ondermijnde de isolatie. Oorspronkelijk wilde men nagaan hoe de vorming van die kanaaltjes te voorkomen was, maar op een gegeven moment draaide onderzoeker Rob Ross de onderzoeksvraag om en probeerde de vorming van ionenkanalen juist te stimuleren. Ross had bedacht dat ionendoorlatende membranen juist heel bruikbaar waren voor waterzuivering, voor nierdialyse en voor energieopwekking. Het onderzoek werd ondergebracht bij de groep industriële kunststoffen van Kema. De uitdaging was volgens Josien Krijgsman om de prijs van de ionengeleidende membranen drastisch te verlagen: van ongeveer honderd euro per vierkante meter terug naar vijf euro of minder. Ze zag wel mogelijkheden, want de grondstof polyethyleen is spotgoedkoop.

Twee jaar later is het membraan nog steeds de bottleneck. Als ik er naar vraag, haalt Jan Post een koelkastdoosje te voorschijn. Daarin drijft

een beigekleurig, beetje stug folie: het ionendoorlatende membraan. 'Als je het een minuut op het droge laat liggen, is het onbruikbaar geworden,' vertelt Post. Het spul, nog steeds op basis van polyethyleen, kost nu 40 euro per vierkante meter. Wat verbazend is, omdat polyetyleen ook de grondstof voor boterhamzakjes is, en wat kost dat nou helemaal? De verklaring voor het verschil zijn de geladen groepen die in het polymeer zijn aangebracht. Post legt uit dat er postief- of negatief-geladen moleculen aan de polymeren gehecht worden, afhankelijk van of het folie chloor- of natriumionen moet aantrekken. Dat proces gebeurt handmatig, omdat er geen grote hoeveelheden folie worden afgenomen. Post denkt dat automatisering van de preparatie van de folies de prijs flink kan drukken.

Maar de prijs is niet het enige probleem met de folies: de elektrische weerstand is ook veel te hoog. In een andere hal staat een metershoge opstelling van wel 1200 cellen. De opstelling bestaat uit een forse bodem en deksel voorzien van flinke slangen en pijpen, met daar tussenin een twee meter hoge stapel van cellen waarin zeewater en zoet water tegen elkaar in stromen. De opstelling is afgeleid van een ontziltingsinstallatie die precies andersom werkt: zoutionen worden uit het zeewater verwijderd door er een elektrische spanning overheen te zetten. Bij de opstelling van Wetsus zouden de 1200 cellen van 80 millivolt ieder samen een spanning op moeten leveren van zo'n 100 volt. Dat gebeurde ook, maar de interne weerstand van de opstelling bleek te hoog, waardoor de geleverde stroom erg klein bleef. 'Er kon wel een lamp op branden,' vertelt Post. Maar dat lijkt een erg omslachtige manier om licht te maken.

Ik denk aan wat hoogleraar Cees Buisman (hoogleraar milieutechnologie aan de Wageningen Universiteit en wetenschappelijk directeur Wetsus) er twee jaar geleden over zei: 'Het kost nog zeker twaalf promovendi voordat er een demonstratie-opstelling staat.'

Toch gaat het onderzoek eind van dit jaar opschalen. Er komt een proefopstelling bij de zoutfabriek Frisia in Harlingen. Frisia heeft er wel belangstelling voor, omdat de zoutfabriek een grote afnemer is van stroom. Het zout is afkomstig uit de ondergrond en wordt door spoeling naar de oppervlakte getransporteerd. Het pekelwater is met 300 gram per liter tien keer zouter dan zeewater. Maar het water moet verdampt worden om het zout te winnen en dat kost veel energie. Directeur Laurens Mulder zag dan ook wel wat in de 'Blue Energy'. Niet alleen gebruikt zijn bedrijf veel elektriciteit, er zijn ook forse stromen van

zoet, zout en superzout water ter beschikking. Een betere proeflocatie konden de onderzoekers zich niet wensen. Frisia is 'partner' geworden in het onderzoek en draagt er volgens directeur Mulder 'tienduizenden euro's' aan bij.

Bij Frisia ligt de nadruk op opschalen. Vanaf laboratoriumniveau van watts naar kilowatts. Uiteindelijk is het de bedoeling om een prototype centrale met een vermogen van tussen 250 kilowatt en 1 megawatt te installeren op de Afsluitdijk. Als die het houdt, en het folie betaalbaar is geworden, zouden grotere centrales op de Afsluitdijk en in Zeeland kunnen profiteren van het uitstromende rivierwater. Gemiddeld stroomt er per seconde 3300 kubieke meter zoet water naar de zee wat overeenkomt met een geschat winbaar vermogen van 3300 megawatt.[137] Als tien procent van het water door een 'Blue Energy'-installatie stroomt, levert dat 300 megawatt op: 2,5 procent van het nationale stroomverbruik.[138] Als dat weinig klinkt: het zou een derde zijn van de duurzame stroom op dit moment.[139]

Ondernemer Laurens Mulder (Frisia) is zich bewust van het prille karakter van de technologie. 'Als je bezig bent met experimentele technologie loop je altijd het risico dat je ergens tegenaan loopt waarvan je zegt: dat lukt niet meer. Dat is het risico van dit soort programma's. Maar dat is tot op heden nog niet gebeurd.'

Promovendus Jan Post probeert in het laboratorium het proces te optimaliseren. Daarnaast onderzoekt hij hoe de verschillende folies zich houden in een omgeving van rivier- en zeewater. Het is belangrijk dat er zich geen aangroeisels vormen, maar dat lijkt eenvoudig te voorkomen door regelmatig om te schakelen van zout naar zoet water. Voor de lokale biologie is dat verwoestend (schippers gaan daarom regelmatig de zeesluis door om de aangroei op het onderschip te verminderen), maar voor de werking van de cellen maakt die omschakeling van zout naar zoet niet uit.

Technologiescout Gerrit Oudakker tenslotte is in juli 2004 overgestapt van Volker Wessels naar Wetsus waar hij een bijdrage hoopt te kunnen leveren aan een doorbraak op het gebied van ontzouting van zeewater, het omgekeerde proces dus van 'Blue Energy'. Oudakker hoopt de prijs van ontzilting terug te kunnen brengen tot een eurocent per kubieke meter waardoor goed drinkwater uit zeewater ook voor ontwikkelingslanden bereikbaar wordt.

Blue energy

Om het zout uit zeewater te krijgen kost energie. Omgekeerd, als je zoet later later verzouten, levert dat energie op.

Bij 'Blue Energy' stromen zoet en zout water langs elkaar in cellen, maar blijven door membranen van elkaar gescheiden. Zeewater bevat ongeveer 33 gram natriumchloride per liter. Het zout is opgelost in positieve natriumionen (Na^+) en negatieve chloorionen (Cl^-). Aan weerszijden van de zoute stroom zijn twee verschillende membranen aangebracht. Het ene laat alleen negatieve ionen door (anionmembraan), het andere (kationmembraan) alleen postieve ionen. De membranen zijn selectief dankzij geladen molecuulgroepen die erop aangebracht zijn. Positief geladen groepen trekken de negatieve ionen aan en omgekeerd.

Door de hoge concentratie van ionen in het zeewater ten opzichte van zoet water is er een zogeheten osmostische druk die de ionen door de membranen heendrukt. Die osmotische druk bedraagt volgens de formule van Van 't Hoff voor zeewater en zoet water maar liefst 27 atmosfeer.

Vanuit het zoute water worden zo negatieve ionen naar de ene kant geperst, en positieve naar de andere kant. Het netto resultaat is een elektrische stroom door de membranen. Ieder compartiment met zout water en zoet water levert een spanningsverschil op van 80 millivolt. Serieschakeling van een groot aantal compartimenten of 'cellen' is dus nodig om tot een werkbare spanning te komen.

Het uitstromende water is 'brak'. Het zoete water is zouter geworden en het zoute water zoeter. De energie die aan het water onttrokken is, gaat ten koste van de warmte-inhoud van het water. Het uitstromende water is ongeveer een halve graad in temperatuur gedaald.

Meer met minder

FIG.69 Proefopstelling micro-wkk's. – Foto: JW

'Onze gloeilampen vervangen, onze boilers en koelkasten. Onze huizen isoleren, zuinige auto's kopen en gebruik maken van openbaar vervoer. Dat zijn zaken die we zouden moeten doen als we onze leefomgeving willen beschermen en een stabiele energievoorziening willen achterlaten voor onze kinderen.'

(Uit het Europese actieplan voor 20% minder energieverbruik in 2020, 19 okt 2006)

Drie keer langer op een liter

In Apeldoorn zit het bedrijfje *e-Traction* dat een stadsbus ontwikkeld heeft die met een derde van de diesel toe kan. Het klinkt ongelofelijk, maar metingen van TNO bewijzen het. De zogenaamde Fluisterbus (internationaal 'The Whisper') gebruikt in de stad 15 liter diesel voor 100 kilometer en daarbuiten 12,8 liter. Voor een gewone bus zijn die getallen 45 respectievelijk 33.

De man achter de Fluisterbus is de HTS-er werktuigbouw Arjan Heinen (58). Een slanke en energieke man met een missie. Hij wil aantonen dat het wegverkeer op het verkeerde spoor zit, maar hij heeft de macht van het getal tegen. Heinen wordt er alleen maar energieker van. Hij praat met hoge stem honderduit en smijt met getallen om zijn verhaal te illustreren. Heinen is een techneut, een werktuigbouwer die de versnellingsbak, waar vakgenoten graag likkebaardend naar kijken, wil afschaffen.

Een versnellingsbak, hoe ingenieus ook, is een onding, heeft hij ontdekt. Hij heeft berekend dat het rendement van 'de mechanische aandrijflijn' van de auto (alle mechaniek tussen motor en wielen) de meeste tijd maar 35 tot 40 procent bedraagt. De helft tot tweederde van de energie gaat verloren in de aandrijving. Hij schrok er zelf van. Zo erg kan het toch niet zijn? Wel dus. En alle auto's rijden ermee. Die ontdekking was in 1995 en Heinen begon te beseffen dat het wegverkeer twee tot drie keer efficiënter, en daarmee schoner kon.

FIG.70 Arjan Heinen bij zijn fluisterbus. – Foto: JW

Een bedrijfsterrein aan de rand van Apeldoorn. De garagedeur rolt open en we lopen naar binnen. Een witte stadsbus rijdt langzaam achteruit. Piep – piep – piep. Geen dieselgeronk, maar een vreemde spookachtige stilte als het grote witte gevaarte langs ons naar buiten rolt. Er zoemt iets, dat is het enige. 'De hydraulische pomp voor de stuurbekrachtiging,' legt Heinen uit. De motoren van de bus zijn ondergebracht in beide achterwielen, of moet je zeggen: de achterwielen *zijn* de motoren. Want zo is het feitelijk. Twee grote elektromotoren van 60 kilowatt. Die hoor je niet. Heinen legt zijn hand tegen de naaf van het wiel om de temperatuur te voelen. Het is een gewoonte van hem om het rendement van de aandrijving in de peiling te houden. Maar zelfs na een rit van een uur zijn de wielen niet veel meer dan handwarm. De aandrijving hier is puur elektrisch en heeft een rendement van 90 procent.

We stappen in voor een demonstratierit. De bus is niet traag. Er is een maximale versnelling ingesteld van 1,1 meter per seconde kwadraat. Dat is een gerieflijke versnelling voor de passagiers. Verder valt voor het eerst op hoeveel herrie het interieur van de bus maakt: de klapperende ruiten en de bonkende vering. Normaal wordt dat geluid overstemd door de brullende diesel. Aan de hand van een beeldscherm voorin de bus laat Arjan Heinen zien hoe het systeem functioneert. De motoren in de achterwielen krijgen hun stroom vanuit een pakket lithiumaccu's met een maximaal vermogen van 80 kilowatt. Die accu's worden bijgeladen tijdens het remmen (70 procent van de energie wordt zo teruggewonnen) en door een dieselgenerator (40 kilowatt). Op het scherm zijn alle wisselende energiestromen te volgen, evenals het brandstofverbruik en de temperatuur van de wielen (nu zo'n 35 graden).

Na tien minuten schiet achterin de dieselmotor aan om de accu's bij te laden. De motor is zwaar geïsoleerd – dat kan als er geen overbrenging aan vast zit – en maakt een stuk minder lawaai dan gebruikelijk. Na terugkomst laat Heinen me de motor en de generator zien. Het zijn twee blauwe stalen kasten achterin de bus. Het uitbouwen van de motor is een kwestie van een paar kabels en slangen loskoppelen en de kist eruit tillen. Zo eenvoudig gaat dat bij een elektrisch aangedreven bus.

Ik moet zeggen: ik ben onder de indruk. Aanvankelijk had ik zo mijn twijfels. Een eenling in de provincie die zegt dat iedereen het eigenlijk fout doet, dat moet haast wel een zonderling zijn. Maar de rit heeft me aan het denken gezet. Misschien is het in feite wel erg ouderwets om een as aan een draaiende motor te maken en zo een voertuig voort te bewegen. Niemand heeft er ooit over nagedacht of het wel de beste

methode is. Het is vanaf de eerste auto van Karl Benz in 1886 in dezelfde richting verder ontwikkeld. Elektrische auto's zijn nooit serieus genomen omdat iedereen aannam dat je een enorm pakket accu's aan boord moest hebben om enkele tientallen kilometers ver te komen. De Fluisterbus komt met een volle tank tot in Italië.

'Ze maken allemaal dezelfde fout,' legt Heinen uit in zijn kantoor. Een buswiel op zijn kant doet, afgedekt met een glazen plaat, dienst als salontafel. 'Iedereen denkt vanuit de motor. Daar zijn ze allemaal verliefd op, hoe groter hoe beter. Maar je moet het omkeren. Je moet vanaf het wiel denken, want daar gebeurt het. U bent technisch toch? Hoeveel vermogen heeft een auto van duizend kilo nodig om stationair 50 kilometer per uur te rijden? Eén, twee, vijf of tien kilowatt?' Ik maak een schatting: twee. 'Nee,' corrigeert Heinen, 'één kilowatt maar! En dat terwijl de motor minstens een vermogen van zestig kilowatt (tachtig pk) heeft.'

In een vlot tempo komen de getallen eruit, ik schrijf mee zo goed als het gaat. Bij een snelheid van 50 kilometer per uur heeft een auto 1,3 kilowatt nodig om wrijving te overwinnen. Een liter diesel levert 10 kilowattuur warmte, een dieselmotor heeft een rendement van 40 procent, dus komt er 4 kilowattuur bewegingsenergie uit een liter diesel. Voor honderd kilometer zijn 2 keer 1,3 is 2,6 kilowattuur nodig, dus nog geen liter. Theoretisch heb je dus minder dan een liter diesel nodig voor 100 kilometer in een personenauto. 'Als je gewoon rekent dan moet dat de uitkomst zijn,' benadrukt Heinen. 'Maar in de praktijk haal je hooguit 1 op 18, dus 5,5 liter per honderd kilometer.' Dat biedt veel ruimte voor verbetering.

Zijn verhaal is duidelijk: het wegverkeer kan makkelijk twee tot drie maal zuiniger, wanneer je overstapt op elektrische aandrijving. En de hybride auto's dan? Daar heeft Heinen het niet zo op. De constructie van een elektrische aandrijving rondom de traditionele aandrijflijn vindt hij onhandig en duur. Dan liever een helder concept: elektrische aandrijving met een verbrandingsmotor die via een generator de accu's op spanning houdt.

De opklapkar

Het immer inventieve Medialab van het Massachusetts Instituut voor Technologie (MIT) heeft een oplossing bedacht voor de files en de CO_2-

uitstoot in de stad: de City Car. Of in goed Nederlands: de opklapkar.

Het is een lichtgewicht elektrisch aangedreven autootje dat goedkoop geproduceerd kan worden. Het is bedoeld voor forensen die simpelweg een City Car kunnen oppikken van een van de standplaatsen waar ze opgeklapt staan op te laden worden voor de volgende rit.

Het hele ontwerp draait om de gerobotiseerde wielen. Het is niet overdreven om te zeggen dat het MIT het wiel opnieuw heeft uitgevonden, want het in ieder van de vier wielen zit een elektromotor, een stuur- en remmechaniek, ophanging en een digitale communicatie-unit. Alles samengeperst in een waterdichte unit die met een kliksysteem aan het chassis bevestigd zit.

FIG.71 De stapelbare stadsauto volgens MIT. – Tekening Franco Vairani

Een motorkap heeft de opklapkar niet. Alleen een gebogen glazen plaat rondom de cabine tot aan het chassis. De kleur wordt aangepast aan de smaak van de bestuurder, net als de rijstijl. Gegevens die het systeem van de chipkaart van de bestuurder afleest. Binnenin zit geen rond autostuur, maar een stuur van een brommer of motor. Het rijden is wel als in een auto, maar dan stiller.

'We zien de auto als een mobiele computer met wielen,' vertelt Ryan Chin van het Medialab aan de plaatselijke Boston Globe. 'Deze auto moet veel rekenkracht hebben. Hij moet precies weten waar de gaten in de weg zitten.'[140]

Opvallend is verder de draaicirkel van 0 meter. De City Car draait namelijk, dankzij zijn slimme wieltjes, om zijn as. Handig bij krap inparkeren. Overigens kun je dat parkeren ook aan de auto zelf overlaten.

Eind 2007 moet het prototype klaar zijn, waarna de medewerkers er mee over de campus willen rijden. Serieuzer is het voornemen om General Motors, die het project sponsort, in 2008 een concept te laten maken om op autotentoonstellingen te laten zien.

Volgens trendwatchers van Global Insight is de City Car één van de futuristische projecten die autofabrikanten en onafhankelijke laboratoria ontwikkelen als antwoord op de groeiende bezorgdheid over het broeikaseffect, verkeersopstoppingen en energiegebruik. 'De bestaande infrastructuur kan de groei niet meer aan. Ze gaan daarom aantrekkelijke alternatieven ontwikkelen.'

Apeldoorn afficheert zich graag als duurzame gemeente. Je zou dus verwachten dat er een vloot aan Fluisterbussen rondrijdt. Maar dat blijkt niet het geval. Als we door het centrum rijden maakt Arjan Heinen me attent op de Stationsstraat. In de spits rijden hier honderd bussen per uur door de straat. Aan beide kanten staat bebouwing, zodat de lucht met alle dieselfijnstof er lang blijft hangen. Volgens Heinen voldoet 'de smerigste straat van Apeldoorn' allang niet meer aan de Europese normen voor luchtkwaliteit.

De Fluisterbus waar we in rijden zou het probleem makkelijk kunnen oplossen. Het brandstofverbruik is een derde van wat gebruikelijk is, de uitlaatgassen worden bovendien gefilterd met de *e-Mission Particle Eliminator*, een roetfilter dat de hoeveelheid fijnstof met 80 procent terugbrengt. Bovendien kan de Fluisterbus in de binnenstad ook geheel emissievrij rijden. Volgens Heinen is het een koud kunstje om gebieden in te programmeren op basis van GPS-coördinaten waarbinnen de bus er automatisch van af ziet om de diesel te starten. Het raadsel wordt er voor mij alleen maar groter door. Waarom rijden er hier geen Fluisterbussen in plaats van diesels?

Wethouder Rob Metz (VVD) van Verkeer en Vervoer verklaart dat hij de Fluisterbus een sympathiek project vindt. Drie jaar geleden werd hij er voor het eerst mee geconfronteerd, en heeft toen samen met de provincie eraan gewerkt dat het idee vanaf de tekentafel naar een demonstratiemodel kon groeien. Daar is het toen blijven hangen omdat twee jaar geleden de gemeente geen concessie meer had voor het openbaar vervoer. Het openbaar vervoer moest geprivatiseerd worden en die taak werd uitbesteed aan een vervoersbedrijf. 'We hebben toen wel aangegeven dat het initiatief verder uitontwikkeld moest worden, maar ik kan de vervoerder moeilijk dwingen om vijf nieuwe bussen te kopen,' verklaart Metz zijn onmacht.

De 'vervoerder' in Apeldoorn is het busbedrijf BBA. Hoofdkantoor in Venlo, en de plaatselijke manager is Jan Smit. Een lange Fries met een kortgeschoren baardje en een grote nuchterheid. Natuurlijk vindt hij de Fluisterbus een interessant initiatief, maar voor de vervoerder staat betrouwbaarheid voorop. Het is leuk om met een groen imago te kunnen pronken, maar als er mensen voor niets aan de halte blijven staan te wachten, dan is de lol er gauw vanaf. Iedere vervoerder weet: diesels zijn betrouwbaar en ze gaan lang mee. Bovendien, diesels kennen ze door en door in het bedrijf. Dus naast interesse is er ook een afwachtende reserve. Daar komt nog bij dat de bussen 80.000 tot 100.000 euro duurder zijn in de aanschaf.

En wat ook al niet hielp was dat BBA zich op gegeven moment onder druk gezet voelde om een aantal Fluisterbussen aan te schaffen. 'Het is een beetje stukgelopen op het feit dat *e-Traction* bepaalde garanties wilde,' verklaart Smit. 'Ze hebben ons gevraagd te garanderen dat we een bepaald aantal bussen zouden afnemen.' BBA voelde daar niets voor omdat ze net een nieuw wagenpark had aangeschaft voor Apeldoorn. Die bussen zouden dan versneld afgeschreven moeten worden. 'Daar zijn kosten aan verbonden en dan moet je overleggen over hoe je dat gaat oplossen.'

Wethouder Rob Metz werkt nu aan een regeling. De bussen zijn duurder, maar volgens Heinen verdient een busmaatschappij het verschil binnen drie jaar terug door uitgespaarde brandstofkosten (geschat op 25 tot 30.000 euro per jaar). Metz wil nu een garantieregeling opstellen, dat de vervoerder ook echt op die terugverdientijd kan rekenen.

Jan Smit (BBA) ziet wel mogelijkheden voor extra subsidies: 'Als de Europese regelgeving over luchtkwaliteit wurgender wordt, komen er misschien meer gelden uit Den Haag en mogelijk is dat een kans om de bus snel in productie te nemen.'

'Het is een menselijk probleem,' vat Heinen de impasse samen. Het lijkt mij een typisch probleem van Innovatie in de Lage Landen. Want hoe kom je hieruit?

'Het lost zich vanzelf op,' kraait Heinen vrolijk. 'De diesel wordt vanzelf duurder. We zitten nu op 60 dollar per vat, dat gaat misschien een beetje naar beneden, maar het is de aanzet tot de volgende sprong. Want meneer Rein Willems van de Shell heeft al gezegd dat om olie uit leisteen te halen, de prijs naar 85 tot 90 dollar per vat moet. Anders kunnen ze de benodigde investeringen niet doen. Dus het gaat gewoon vanzelf gebeuren. De wal keert vanzelf het schip.'

Stroom uit de combiketel

Uw volgende ketel voor de centrale verwarming voorziet ook voor de helft in uw stroombehoefte. Dat denken althans de grote energiebedrijven op dit moment. Zij zien cv-ketels die naast warmte ook stroom leveren –in technisch jargon staat dit bekend als warmtekrachtkoppeling of wkk- als de volgende generatie combiketel, na de huidige 'hoog rendement' of HR-generatie. In technische kringen is men kennelijk dol op afkortingen. Zulke apparaten voor particuliere huishoudens worden aangeduid met de term micro-wkk en daar wordt veel van verwacht.

In november 2006 wordt de eerste grootschalige proef met micro-wkk's in Nederland gehouden. In een hal bij Kiwa-Gastec op een industrieterrein in Apeldoorn staan vijftig ketels in vier rijen opgesteld. De apparaten van het merk Whispertech zijn vanuit Nieuw-Zeeland geïmporteerd door Gasterra, voorheen de Gasunie. Kiwa-Gastec is Europees marktleider op het gebied van meting en certificering van gasapparaten. De vijftig ketels – zo groot als een koelkast voor onder het aanrecht – staan met z'n allen aangesloten op één transformatorkast. Drie netwerkbeheerders, Continuon, Eneco en Essent, willen weten wat er met de netspanning gebeurt als al die kleine generatoren allemaal tegelijk stroom gaan leveren, of er allemaal tegelijk mee uitscheiden. Normaal gesproken mag de netspanning van 230 volt hooguit 10 procent variëren, maar hoe regel je dat als je de spanningsbronnen niet meer onder controle hebt? 'Voor ons is het een hele nieuwe manier van denken,' zegt Ir Martijn Bongaerts van Continuon in het *Technisch Weekblad*, 'maar dit komt eraan en wij moeten ons erop voorbereiden.'[141]

Ik heb bij Kiwa-Gastec afgesproken met Henri Giesen, productontwikkelaar bij Essent. We zitten aan een tafel in de ruime ontvangsthal. Uit een kartonnen doosje haalt hij een flonkerend goudkleurig machientje te voorschijn. In eerste instantie lijkt het op een speelgoed stoommachientje. Maar dat klopt niet, want daar steekt niet, zoals hier wel, een glazen buisje uit.

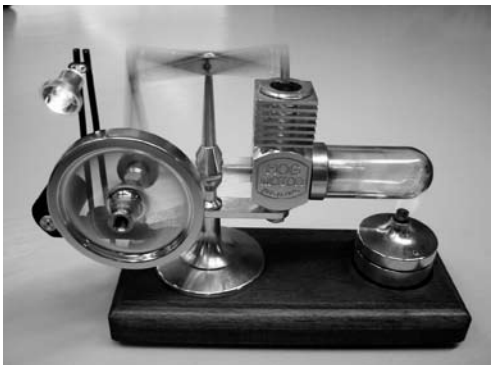

FIG.72 Stirlingmotor in actie

'Dit', legt Giesen uit, 'is een stirlingmotor. Uitgevonden in 1816 door een Schotse predikant. De motor zet een temperatuurverschil om in beweging.' Daarop opent hij een soort koperen pillendoosje en schenkt er een heel klein scheutje spiritus in. Het dekseltje met lontje gaat eroverheen en het brandertje komt onder het glazen buisje te staan. Giesen haalt een aansteker uit zijn zak en steekt de spiritusbrander aan. Een vlammetje van een halve centimeter hoog brandt nu onder het glazen buisje. 'En nu even wachten,' zegt Giesen, een praatgrage en opgewekte vijftiger uit Limburg. Aan de telefoon heeft hij me al over zijn demonstratiemodel verteld en het is aanstekelijk om zijn jongensachtige enthousiasme te zien.

Ondertussen beweegt het goudkleurige vliegwiel een fractie. Voor Giesen is dat een teken dat het apparaat opgewarmd is. Met een klein duwtje zet hij het vliegwiel in beweging en het apparaatje begint te lopen als een naaimachientje, met een onverwachte snelheid. Dan zet Giesen een minuscuul dynamootje tegen het vliegwiel, dat daar een beetje door afremt, en een klein blauw LED-je licht op. 'Alsjeblieft,' zegt Giesen triomfantelijk, 'dit is warmtekrachtkoppeling in zijn puurste vorm. Warmte wordt omgezet in beweging en daaruit maakt de dynamo elektriciteit. Eenvoudiger kan het niet.'

In tegenstelling tot een gewone of verbrandingsmotor vindt bij de stirlingmotor de verbranding niet in maar buiten de motor plaats. De stirlingmotor zelf is een gesloten systeem waar niets in- of uitgaat. De doorvoer van brandstof met kleppen in de cilinders, zoals bij een verbrandingsmotor, kan daardoor achterwege blijven. Een temperatuurverschil is voldoende om op te draaien.

Hoe werkt de stirlingmotor?

De stirlingmotor is een elegante uitvinding die een warmtestroom omzet in beweging. De warmte kan overal vandaan komen: geconcentreerde zonnewarmte, gasbrander, houtvuurtje, kernreactor of zelfs handwarmte. Echt, ingenieurs in Japan hebben een motortje ontwikkeld dat aan 7 graden temperatuurverschil tussen warme hand en koude omgeving genoeg heeft om te draaien: de zogenaamde *Palmtop Stirling engine*. Maar de stirlingmotor werkt het meest efficient wanneer het temperatuurverschil tussen warme en koude kant flink groot is.

Volgens de tweede hoofdwet van de thermodynamica kan warmte nooit volledig omgezet worden in arbeid. De maximale hoeveelheid arbeid uit een hoeveelheid warmte Q bij een temperatuur T (in graden Kelvin = graden Celsius + 273) bedraagt bij omgevingstemperatuur T_{omg}:

$$W = (1 - T_{omg} / T)*Q$$

De factor $(1 - T_{omg} / T)$ wordt de Carnot-factor genoemd. Die is altijd kleiner dan 1 en groter dan 0, maar groter naarmate de temperatuur T van de warmtebron hoger is.

De uitvinding van de stirlingmotor stamt uit 1816 en werd gedaan door de Schotse dominee Robert Stirling en zijn broer James, die ingenieur was. Het apparaat was bedoeld als alternatief voor de stoommachine en het was daar ook ver superieur aan: het had geen stoomketel nodig en het rendement lag enorm hoog: tot 80 procent van het theoretisch maximum van de Carnotcyclus. Ter vergelijking: een stoommachine komt niet verder dan 8 procent. Daar komt nog bij dat de constructie van de stirlingmotor eenvoudig is omdat het een gesloten systeem is: hetzelfde gas wordt eindeloos heen en weer gepompt tussen koude en warme kant. Dat betekent dat er geen kleppen nodig zijn zoals in een stoomachine of een verbrandingsmotor.

Eigenlijk is het wonderlijk dat zo'n elegant machientje geen grotere toekomst heeft gekregen. Sommigen denken dat de relatief hoge aanschafprijs de oorzaak is, anderen zeggen dat de elektromotor die rond 1821 door Michael Faraday werd uitgevonden de stirlingmotor uit de markt heeft gedrukt. Nu, bijna tweehonderd jaar later, is er reden om aan te nemen dat de stirlingmotor alsnog een toekomst krijgt.

Een stirlingmotor bestaat in zijn oervorm uit twee cilinders (een heet en de ander koud) onder een hoek van 90 graden. Onder de hete cilinder brandt bijvoorbeeld een vlam, en de koude cilinder is van koelribben voorzien. De twee cilinders zijn aan dezelfde krukas verbonden en er loopt een gasleidinkje tussen de twee cilinders. Aan het uiteinde van de krukas zit een vliegwiel bevestigd.

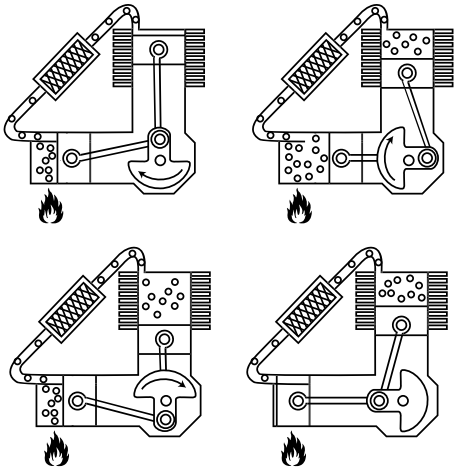

FIG.73 Schematische voorstelling Stirlingmotor

De werkcyclus bestaat uit vier stappen: uitzetting, transport, inkrimping en transport. Op zeker moment staat in de koude cilinder de zuiger helemaal bovenin, en brandt onder de warme zuiger een vlammetje. Het gas erin verhit en zet uit. Het drukt de warme zuiger naar binnen, en via het verbindingsbuisje de koude cilinder eveneens. Als het gas maximaal is uitgezet (met een factor drie ongeveer) en de warme cilinder helemaal naar binnen is gedrukt, komt de volgende fase: het transport van het gas van de warme cilinder via de verbindingsbuis naar de koude cilinder. Door de traagheid van het vliegwiel draait de krukas 90 graden door, in de richting van de klok. Het gas zet nu uit en koelt daardoor af. Wanneer de koude cilinder de maximale grootte heeft en het gas nog verder afkoelt, trekt het beide zuigers naar buiten door de onderdruk. Als de warme zuiger al helemaal bovenin de cilinder zit, bevindt al het gas zich in de koude cilinder. Het vliegwiel zet de krukas 90 graden door, zodat het gas van

de koude cilinder terugstroomt naar de warme. Van dit punt begint het verhaal overnieuw.

Een belangrijk maar tot nu toe verzwegen onderdeel bij de kringloop is de verdikking halverwege het verbindingsbuisje tussen de cilinders. Dit is de zogenaamde *regenerator*, die door Robert Stirling werd bedacht. Hierdoor ging het rendement van de machine met sprongen vooruit en demarreerde de Stirlingmotor uit het peloton van andere heteluchtmachines die toen in ontwikkeling waren. De *regenerator* bestaat meestal uit een met metaalgaas gevulde cilinder. De functie is om tijdens de transportfase het gas voor te verwarmen of alvast af te koelen. Het is een tijdelijke, zeer effectieve warmteopslag.

Vergeleken met verbrandingsmotoren met hetzelfde vermogen zijn stirlingmotoren meestal zwaarder en duurder, maar het rendement ligt hoger, waardoor minder brandstof wordt gebruikt. Zolang brandstof goedkoop is, is de verbrandingsmotor favoriet. Maar nu de brandstof duurder wordt, komt de stirlingmotor terug in de belangstelling.

We gaan kijken naar het nieuwe type cv-ketel met ingebouwde stirlingmotor. Door de lange gangen van het complex in Apeldoorn komen we bij de testruimte. Daarbinnen wordt de temperatuur nauwkeurig constant gehouden om de prestaties van cv-ketels te kunnen meten.

We banen ons een weg tussen de kabels en slangen en komen terecht bij de opstelling waaraan gemeten wordt. Aan de muur hangt een micro-wkk. Je zou zeggen: een doorsnee combiketel met een modieus metallic grijze mantel en een uitgebreid display onderin. Een technicus haalt de grijze kap eraf zodat we er binnenin kunnen kijken. Bovenin hangt een compacte brander in de vorm van een gekantelde cilinder met 20 centimeter doorsnee. Nader beschouwd zijn het twee branders: één met een vermogen van 5 kilowatt warmte en nog een andere met 19 kilowatt. ‘Tachtig procent van de tijd is 5 kilowatt voldoende om het huis warm te houden,’ legt Giesen uit. ‘De extra capaciteit is vooral van belang om te douchen of om het huis snel op te kunnen warmen.’ Eenmaal op temperatuur is 5 kilowatt voldoende, vandaar dat dat deel in warmtekrachtkoppeling is uitgevoerd. Onder de brander bevindt zich een staande metalen cilinder van ongeveer 40 centimeter hoogte waarin een stirlingmotor met een generator is ondergebracht. Op de meta-

len plaat is te lezen dat het elektrisch vermogen 1 kilowatt bedraagt, bij 230 volt en 50 Hertz.

Het doel van het onderzoek in de testruimte is een protocol te ontwikkelen waarbij maximaal stroom geproduceerd wordt bij een bepaalde hoeveelheid warmte. Daarvoor is het nodig om de kleine brander (5 kilowatt thermisch) maximaal te benutten en de grote douchebrander zo weinig mogelijk. Een ingebouwde boiler helpt daarbij.

Maar wat nu als de verwarming afslaat en er geen stroom meer geproduceerd wordt? Het is duidelijk dat zo'n micro-wkk in z'n eentje niet geschikt is om het huishouden van energie te voorzien. Een aansluiting op het elektriciteitsnet blijft nodig. Maar er is dan, in tegenstelling tot de meeste aansluitingen nu, sprake van teruglevering van stroom aan het net. Netwerkbeheerders zien dat met enige zorg tegemoet. Tot nu toe waren zij de enigen die stroom leverden aan het net, en hielden zo de zaak onder controle. Maar als particulieren opeens stroom gaan leveren, wat betekent dat voor de stabiliteit van de spanning op het net? Om dat uit te proberen hebben netwerkbeheerders een proefopstelling gebouwd in een hal bij Kiwa-Gastec. Daar staan 50 micro-wkk's opgesteld in vier rijen. 'Hier proberen we uit wat in de praktijk nooit zal gebeuren,' legt Giesen uit. 'We zetten alle apparaten tegelijk aan of tegelijk uit en we kijken welke invloed dat heeft op de netspanning. Hoe gedraagt het systeem zich in zulke extreme omstandigheden. Kan een trafo daardoor doorbranden?'

In het *Technisch Weekblad* legt ir. Martijn Bongaerts (Continuon) uit dat men zich voorlopig beperkt tot inventarisatie van de problemen. Hoe daarmee om te gaan is een onderwerp voor later. Bongaerts: 'Bij een grootschalige levering van elektriciteit aan het net moet hoe dan ook meer intelligentie onderin de elektriciteitsketen worden ingebouwd. Dat zou op het niveau van transformatorhuisjes kunnen, maar bijvoorbeeld ook in de micro-wkk zelf.'[142] Giesen ziet wel mogelijkheden in de externe aansturing van micro-wkk's. Een klant neemt zo'n apparaat af van de energiemaatschappij, maar de computer van de netwerkbeheerder bepaalt wanneer het apparaat ingeschakeld wordt. Natuurlijk moet de temperatuur in huis op peil blijven, maar het is mogelijk om warmte te produceren voor een later tijdstip en die op te slaan. De energiemaatschappij verkoopt in zo'n geval geen gas of stroom meer, en verhuurt ook geen apparaten, neen, de maatschappij levert comfort, legt Giesen uit. Het toverwoord hierbij is 'domotica', intelligente aansturing van apparatuur in het huishouden.

'Dit wordt de derde generatie cv-ketels,' stelt Giesen. 'Na de gewone cv-ketel en de hr-combiketel wordt micro-wkk de volgende generatie.' Daarvoor is het wel nodig dat de apparaten beschikbaar zijn en dat de aanschaf interessant is voor de particulier.

De eerste Nederlandse ketelbouwers zijn inderdaad begonnen met micro-wkk's, onder andere Remeha die een paar honderd meter verderop zit. Maar is het ook voordelig? Dat hangt af van onderhandelingen die met het ministerie van economische zaken gevoerd moeten worden. Een micro-wkk is naar schatting 1000 tot 1500 euro duurder dan een vergelijkbare hr-ketel. Dat bedrag moet naar inschatting van Giesen binnen 5 jaar terugverdiend kunnen worden aan teruggeleverde stroom. Maar hoeveel iemand voor die stroom krijgt, is punt van onderhandeling.

In de toekomst, en in de meeste nieuwbouwhuizen nu al, worden huizen voorzien van een zogenaamde intelligente stroommeter. Die meet inkomende en uitgaande stroom apart, en voorziet de energiemaatschappij desgevraagd van het verloop van het stroomverbruik in de tijd. Er zijn dan vier verschillende tarieven: hoog en laag (zoals nu ook al) en in- en uitgaand. De balans daartussen moet zodanig zijn dat een gemiddeld huishouden met zijn 1 kilowatt levering uit micro-wkk de extra aanschafkosten er in vijf jaar uit heeft. 'Met andere woorden,' vat Giesen samen, 'iemand moet zijn energierekening met 200 à 300 euro per jaar zien dalen, ondanks dat er voor de micro-wkk iets meer gas gebruikt wordt.'

Nederland als aardgasland heeft 7 miljoen verwarmingsketels, waarvan er jaarlijks 350 duizend vervangen worden. De gemiddelde levensduur is dus 20 jaar. De vervanging van HR-ketels door micro-wkk is dus hoe dan ook een project van lange termijn. Men rekent op de periode van 2010 tot 2030. 'Als iedereen voor een micro-wkk zou kiezen, zou dat de helft van het huishoudelijk stroomverbruik op kunnen leveren,' rekent Giesen vrolijk voor.

Het rapport *Technisch energie- en CO_2-besparingspotentieel van micro-wkk in Nederland 2010-2030* is iets voorzichtiger en hanteert twee verschillende scenario's.[143] In scenario 1 gaat men uit van 4,1 miljoen micro-wkk's in 2030, in scenario 2 van 2,2 miljoen. Onder scenario 1 is de CO_2-emissie in 2030 dankzij de micro-wkk's 10 miljoen ton CO_2 lager dan nu (5 procent reductie van het nationaal totaal en 13 procent van het aandeel energiesector en huishoudens). Onder het voorzichtige scenario 2 is de CO_2-reductie 5 miljoen ton (2,5 procent van het nationaal totaal en 6 procent van het aandeel energiesector en huishoudens). De

energiebesparing bedraagt volgens hetzelfde rapport in 2030 dankzij de micro-wkk's 95 teraJoule onder scenario 1 en de helft daarvan onder scenario 2. In verhouding tot het energieverbruik van de energiesector (655 petaJoule in 2005) is dat miniem: 0,1 promille. Kort samengevat: micro-wkk kan in 2030 een aardige reductie in de CO_2 uitstoot teweegbrengen (2,5 tot 5 procent), maar draagt niet veel bij in de energiebesparing. De uitstootbeperking is te danken aan het efficiëntere energiegebruik.

Warmte uit de kas

'Kijk,' zegt Stef Huisman en hij wijst naar de rokende centrale aan de horizon, 'dat wordt onze concurrent. En eerlijk gezegd: hij bakt er niks van. Hooguit veertig procent rendement, alle CO_2 gaat de lucht in en de warmte naar de rivier. Goed beschouwd is het een schandaal.'

Stef Huisman is kweker van kantoorplanten in Huissen, Gelderland. De zaak Hydro Huisman loopt goed en Huisman zelf is druk met de laatste hand aan zijn 'energieproducerende kas'. Installatietechnici, elektriciëns en warmtewisselaarspecialisten zijn druk bezig om de machinekamer in gereedheid te brengen. Huisman, een drukke vijftiger met grijs haar, een dun snorretje en een gekreukt colbertje, heeft tijd genomen om me, een week voor de installatie opgeleverd wordt, rond te leiden door de kas die meer energie levert dan hij verbruikt.

'De kas als energiebron' is een programma van de glastuinbouwsector, die in 1997 enkele ambitieuze energiedoelstellingen formuleerde. Eén daarvan is dat nieuwbouwkassen in 2020 vrijwel energieneutraal moeten zijn. Traditioneel is de glastuinbouw een energiehongerige sector die jaarlijks per vierkante meter 10 kilowattuur elektriciteit en 40 tot 50 kubieke meter gas nodig heeft. Landelijk is de sector met 4,5 miljard kubieke meter goed voor 10 procent van het aardgasverbruik.

Nieuwe ideeën en innovatieve technieken moeten die situatie omkeren zodat een kas van grootverbruiker een energieproducent wordt. De kas als centrum van de zogenaamde zonneterp, een cluster van enkele tientallen tot honderden woningen die hun elektriciteit en warmte uit de kas krijgen. De kas zorgt in dat toekomstbeeld ook voor voedsel, afvalverwerking en waterzuivering.

De eerste energieproducerende kas in Nederland, en waarschijnlijk ter wereld, staat sinds begin 2004 in het Zuid-Hollandse Berkel en is eigendom van tomatenkweker Themato. (Theo Ammerlaan, Martin Duindam en Tom Ammerlaan (zoon van Theo)). Theo Ammerlaan, een vijftiger met spierwitte haren en een tomatenrood poloshirt met opschrift THEMATO brengt me naar de 'gesloten kas'. Het is begin februari en

buiten is alles nog doods en kaal. Maar in de kas is de lente al begonnen. Groene pruimtomaatjes ter grootte van pingpongballen hangen in trossen aan de planten. De traditionele kas van Ammerlaan is vier hectare groot. Aan het eind daarvan gaan we een sluis door en komen we in de gesloten kas van 1,4 hectare. Hier is alles high tech. De tomatenplanten staan op lange tafels van een meter hoog en tien meter lang aan weerszijden van het looppad. Er onder hangen witte luchtslangen van 30 centimeter doorsnede waardoor lucht stroomt die de kas precies op temperatuur houdt. 'De kas is een grote zonnecollector,' begint Ammerlaan. 'In de zomer warmt een kas door de invallende zon razendsnel op en gaan de luchtramen open om de warmte te lozen. Maar in de gesloten kas blijven de ramen dicht. In de zomer vangen we de warmte uit de kas op en slaan die op in de ondergrond. In de winter gebruiken we die warmte weer om de kas te verwarmen. Dat scheelt 36 procent in de stookkosten.'

FIG.74 Theo Ammerlaan bij zijn tomaten. – Foto: JW

De installatie bij Themato heet GeslotenKas en is in 1997 ontworpen door het onderzoek- en adviesbureau Ecofys, onderdeel van Econcern. In 2003 heeft Ecofys de verdere ontwikkeling overgedragen aan Innogrow, die het concept van de GeslotenKas nu verder verspreid.

Hans Opdam, een van de directeuren van Innogrow en vanaf het eerste begin aan het project verbonden, legt uit hoe het systeem werkt. De basis is het gebruik van twee warmtebuffers in de vorm van gescheiden grondwaterlagen of aquifers. Oorspronkelijk heeft het grondwater een temperatuur van 12 graden Celsius. Het warmtebuffer warmt door het gebruik op tot 18 graden, en het koudebuffer koelt af tot 6 graden Celsius. Aan het begin van de zomer is het koude buffer groot (de hoeveelheid grondwater van 6 graden Celsius) en het wamtebuffer klein. Aan het eind van de zomer is de situatie net omgekeerd.

In de zomer wordt de kas gekoeld door grote luchtbehandelingskasten met warmtewisselaars (een soort radiatoren) waar koel water door stroomt. Het grondwater dat uit de koudebuffer afkomstig is, warmt daardoor op tot ongeveer 18 graden en wordt naar de de warmtebuffer gepompt. Zo wordt in de loop van de zomer een flink warmtebuffer opgebouwd.

In de winter wordt die warmte gebruikt om de kassen te verwarmen. Warmtepompen onttrekken dan de warmte aan het water van de warmtebuffer. Het afgekoelde water (6 graden) wordt naar de koudebuffer gepompt dat in de loop van de winter groeit.

Technisch zit er nog een stap tussen: het koelsysteem is een gesloten systeem dat aan de ene kant warmte uitwisselt via luchtbehandelingskasten met de lucht in de kas en aan de andere kant via roestvrijstalen warmtewisselaars met het grondwater. Het grondwater wordt dus niet direct door de luchtbehandelingskasten gepompt.

Hoewel de gesloten kas in de zomer meer energie verbruikt dan een conventionele kas omdat het energie kost om de extra warmte weg te koelen, wordt dat in de winter meer dan goed gemaakt door de besparing in de stookkosten. Volgens berekeningen van de ontwikkelaars bij Innogrow gebruikt een gesloten kas 20 procent minder fossiele energie dan de conventionele glastuinbouw. De echte winst komt echter pas als je de extra opgeslagen warmte volledig weet te benutten. Vanwege de lage temperatuur moet dat op zeer korte afstand gebeuren, dus liefst op of direct naast het bedrijf. En dat is precies wat er bij Themato gebeurt: de overtollige warmte uit de GeslotenKas van 14.000 vierkante meter wordt gebruikt om bij te dragen in de verwarming van de 40.000 vierkante meter grote tomatenkas. Door die constructie bedraagt de besparing op energierekening voor beide kassen samen maar liefst 36 procent. Bijkomende voordelen van de gesloten kas zijn een grotere productie door een hogere CO_2-concentratie in de kas. Daardoor groeien de planten beter en leveren ze 20 procent meer op. Verder is het klimaat in de kas gelijkmatiger en is er minder kans op plantenziekten.

De zomerwarmte is geen vijand meer voor Theo Ammerlaan. Ook tijdens weken van hittegolf koelt de installatie de extra warmte goed weg. Warmte is van een plaag veranderd in een reserve. De installatie die daarvoor nodig is zou zich volgens de berekeningen uit 2001 in zeven jaar terugverdienen. Maar met de huidige energieprijzen denkt Ammerlaan al in vijf jaar uit de kosten te zijn.

Hoe werkt een warmtepomp?

De bekendste warmtepomp zit in de koelkast. Daar pompt hij warmte vanuit de koude binnenkant naar de warme buitenwereld. Van nature stroomt warmte van hoge naar lage temperatuur. Er is energie nodig om de warmte 'tegen de temperatuur in' te pompen, net als het energie kost om water tegen de berg op te pompen.

Steeds vaker worden warmtepompen ook gebruikt om gebouwen te verwarmen. Ze werken op dezelfde manier als een koelkast: door een koelvloeistof rond te pompen die aan de koude kant warmte opneemt en aan de warme kant weer afgeeft.

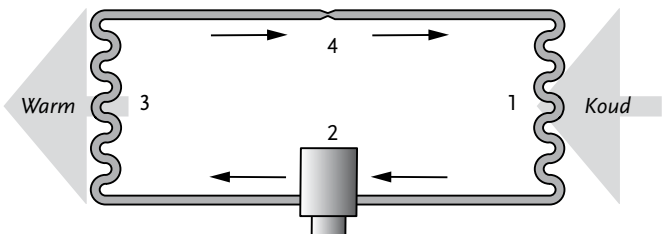

FIG.75 Schematische voorstelling van een warmtepomp.

Aan de koude kant neemt een koelvloeistof (bijvoorbeeld ammonia, en tot 1995 meestal freon) warmte op door verdamping. Iedereen die wel eens pure alcohol op de handen heeft gehad, weet hoe koud het aanvoelt als de alcohol verdampt. Verdamping kost dus veel warmte. Nu is een warmtepomp een gesloten systeem, dus de damp vervliegt niet. De koelvloeistof verdampt in een warmtewisselaar (een soort radiator) die de omgevingswarmte overdraagt op de vloeistof. De pomp perst de damp samen tot een vloeistof. Bij die condensatie (het omgekeerde van verdampen) komt veel warmte vrij en de temperatuur loopt daardoor flink op. Dat bij het samenpersen van een gas warmte vrijkomt – nog afgezien van condensatiewarmte – kan iedereen controleren door een fietsband op de pompen en daarna onderaan de fietspomp te voelen (pas op: heet). Bij een warmtepomp stroomt de samengeperste vloeistof onder hoge druk door de warmtewisselaar aan de warme kant, waar de vloeistof zijn warmte af kan geven aan de omgeving. Bij een koelkast is dat via de radiator aan de

warme achterkant, bij een verwarmingsysteem draagt de warmtewisselaar de warmte over aan een cv-installatie. De koelvloeistof koelt hierdoor af. Dan passeert het een vernauwing (het smoorventiel) waardoor de druk afneemt en de vloeistof al bijna weer gaat verdampen aan de koude kant. Daarmee is de cyclus rond.

Het voordeel van een warmtepomp als warmtebron voor een huis is het hoge rendement: voor iedere eenheid elektrische energie komen drie, vier en soms vijf eenheden warmte terug. De verhouding tussen geleverde warmte en benodigde elektrische energie heet *Coefficient of Performance* (prestatiecoëfficiënt) of COP. Voor een elektrische warmtepomp heeft die COP een waarde tussen 2,5 en 5,0. Strikt genomen mag je niet spreken over een rendement van meer dan 1, want zo zit de natuur niet in elkaar. Vandaar dat men liever over de prestatiecoëfficiënt spreekt.

Voor huishoudelijke systemen is de buitenlucht de eenvoudigste warmtebron, maar die heeft ook nadelen. Zo daalt ongelukkig genoeg de prestatiecoëfficiënt naarmate het buiten kouder wordt en je de installatie harder nodig hebt. Bij –18 graden Celsius kun je dan net zo goed een straalkachel (met COP = 1) aan zetten. Bovendien wil zich nog wel eens ijs op het buitenrooster afzetten, wat het rendement ook niet ten goed komt. Een buitenradiator is dus eigenlijk alleen geschikt voor milde winters.

De grond als warmtebron is een duurdere maar ook betere optie. In de praktijk is dat vaak een geboorde waterput of een stelsel van slangen of buizen onder het maaiveld. De bodemtemperatuur is door het jaar heen vrij constant, waardoor ook de prestatiecoëfficiënt redelijk gelijk blijft. Wanneer het huis bovendien met vloerverwarming is uitgerust, waardoor de temperatuur aan de warme kant relatief laag kan blijven, kan de warmtepomp heel efficiënt werken. Want hoe kleiner het temperatuurverschil, des te hoger de prestatiecoëfficiënt.

In Amerika zijn systemen populair waarbij de warmtepomp omschakelbaar is tot een airconditioner die ’s zomers de warmte vanuit het huis afvoert naar buiten. Ook dan heeft een ondergronds systeem een groot voordeel: de bodem is ’s zomers altijd koeler dan het huis, en kan dus gebruikt worden voor koeling. Een pompje om koelwater rond te pompen is dan voldoende. Een actieve warmtepomp is dan niet nodig.

Op 24 mei 2006 opende ex-premier Ruud Lubbers in Huissen, Gelderland onder grote belangstelling van de pers de eerste zogenaamde 'energieproducerende kas' van het bedrijf Hydro Huisman, kweker van kantoorplanten. Stef Huisman is een enthousiaste prater en een stuk minder bescheiden dan Theo Ammerlaan en zijn companen. Want feitelijk is de gesloten kas van Huisman niet de eerste kas die energie levert, dat gebeurt in Bleiswijk al vanaf februari 2004. Het concept is hetzelfde: een relatief kleine gesloten kas van 2.600 vierkante meter waarvan de opgeslagen warmte gebruikt wordt om bij te dragen in de verwarming van een naastgelegen grotere kas. In het geval van Hydro Huisman circuleert 's winters water van 25 graden door buizen in de vloer. Dat levert 60 procent op van de warmte die de kas nodig heeft.

Een belangrijk deel van de installatie vormen de ultrafijne warmtewisselaars die bij koeling de warmte van lucht naar water overbrengen. De 150 warmtewisselaars zijn de eerste van hun soort, gemaakt door een een kleine firma Fiwihex uit Almelo. Geënt op de ervaring van de textielindustrie aldaar is een warmtewisselaar ontwikkeld die bestaat uit een ragfijn weefsel van koperdraadjes om millimeter dunne buisjes.

Stef Huisman beschrijft het project uitdrukkelijk als praktijkexperiment. Zijn doel ligt verder. Hij is in gesprek met Rabo vastgoed voor een project waarin 300 tot 400 huizen hun warmte krijgen uit het overschot van vijf tot zes hectare gesloten kas, twintig keer groter dan het proefproject. Dan zou de glastuinbouw voor het eerst een nettoproducent van warmte zijn.

Waar Ammerlaan heel pragmatisch zijn stookkosten wil verlagen, daar gaat Huisman een stuk verder in zijn plannen. Het liefst zou hij niet alleen kantoorplanten leveren, maar ook energie: 'We zouden met warmtekrachtinstallaties elektriciteit kunnen opwekken. De warmte slaan we op in de ondergrond en de CO_2 gebruiken we in de kassen. Wij gooien niks weg. Dat doen de grote centrales ons niet na.'

Volgens het rapport 'Kas als Energiebron' van de Kema uit 2002 heeft de gesloten kas een flink potentieel. De warmte van zoninstraling van de totale sector bedraagt 10 procent van het nationale brandstofverbruik.[144] En dat is ruim twee keer meer energie dan de sector nu gebruikt. Met andere woorden: theoretisch is het inderdaad mogelijk om de glastuinbouw van grote energiegebruiker om te vormen tot een aanzienlijke energieproducent, vooral van warmte.

Rijtjeshuis in de duinen

Het blijft een vreemd gezicht blijft: een rijtje keurige eensgezinswoningen in de Pettense duinen met daar tegenover de sobere behuizing van technische onderzoekers: gestapelde portocabins langs een klinkerweg.

Van daaruit loop ik samen met onderzoeksleider Niels Sijpheer naar wat hier heet de 'energietestwoningen'. Niels is een jongensachtige dertiger. Lichtgroen T-shirt, steile haren die op het voorhoofd beginnen te wijken en een stalen brilletje. Hij praat zacht, maar is op zijn eigen rustige manier gedecideerd in zijn doen. Eerst wil hij me de woningen aan de achterzijde laten zien, de zuidkant. De huizen hebben allemaal een andere gevelbekleding. Baksteen, oranje panelen, grijze steen of donker hout. Het doet denken aan de voorgeprogrammeerde variaties van de moderne nieuwbouwwijk. Maar hier zit ongetwijfeld meer achter. In het onderzoek naar de energiehuishouding van het woonhuis gaat niets zonder plan. In de zuidgevel hebben de huizen op de begane grond een grote glazen pui (drievoudig glas met kryptongas) en boven twee grote slaapkamerramen. Op het dak: een variatie aan zonnecollectoren voor opwarming van water en zonnepanelen voor elektriciteitsopwekking. Automatisch bediende zonneschermen houden de zon buiten wanneer het binnen te warm wordt.

FIG.76 De proefwoningen van ECN. – Foto: JW

Dan gaan we naar binnen. Het gevoel van een onbewoond nieuwbouwhuis: weinig sfeer maar vol beloften. Als eerste loopt Niels naar een luik aan de rand van de woonkamer. Moet je kijken. Hij trekt een luik uit de grond dat zo'n twee decimeter dik is. Allemaal isolatiemateriaal. Ook de vloer is zo dik. Maar daar gaat het hem niet om. In het luik zijn slangen en aansluitingen te zien. Eronder, vertelt Niels, ligt een plastic zak met zesduizend liter inhoud als deel van een experiment. Het water in de zak werd vorige zomer met de zonnecollectoren opgewarmd tot maar liefst 90 graden. Vandaar de isolatie dus. Het was de bedoeling hieruit de warmte te betrekken voor de verwarming van het huis in de winter. Maar dat leverde niet veel op. Na een paar maanden al was de warmte uit de zak opgebruikt. Een grotere zak is niet te doen vanwege het ruimtebeslag. Einde experiment, leuke zak in de kelder.

Trap op naar boven. Voeten klossen op de kale houten treden. Op de overloop staan alle deuren naar de kamers open. Kijk, zegt Niels, dit is een bewoner. Ik zie niets en loop de kamer in. Op de vloer staat een kleine elektrische radiator (220 watt) met een snoer eraan. De radiator levert net zoveel warmte als een gemiddelde volwassene, maar is een stuk eenvoudiger in gebruik. Van de huurders zul je niet veel last hebben, zeg ik nog. Humor is niet het sterkste punt in technisch onderzoek.

Een trap verder omhoog komen we in de machinekamer onder het dak. Hier hebben de jongens naar hartelust mogen installeren en bouwen. Hier en daar staan computers en beeldschermen om de warmtehuishouding nauwgezet te volgen. Een blikvanger is een lompe rondige plastic kast met flexibele luchtpijpen. Een warmteterugwinningsinstallatie, legt Niels uit. Bij ventilatie raak je normaal gesproken veel warmte kwijt. De bolle kast bevat een systeem dat de frisse buitenlucht opwarmte met de uitstromende binnenlucht. Nooit meer een raam open, begrijp ik. Maar nee, dat is te streng gedacht. Die lessen heeft men wel geleerd van totalitaire klimaatsystemen. Bewoners willen zelf graag een raampje open kunnen doen.

Beneden, in een hoek van de woonkamer, komen we bij het hart van de installatie: de warmtepomp. Een kast ter grootte van een flinke wasmachine waar acht pijpen op aangesloten zijn. Niels loopt ze langs. Twee voor de zonnecollector, twee voor de ruimteverwarming, twee voor de boiler en twee voor de bodem. De wat? Er blijken drie lussen slang van 25 meter in de achtertuin begraven te liggen. De bodem heeft een temperatuur van ongeveer 12 graden. In de zomer ervaren we dat als koel, maar 's winters is dat warm. De warmtepomp onttrekt warmte aan

het dak of uit de bodem, en geeft die af aan boiler of ruimteverwarming. 'Mensen weten vaak niet wat een warmtepomp is,' legt Niels uit. 'Ik zeg dan: denk aan je koelkast, dat is ook een warmtepomp. Zaag een gat in je gevel, zet de koelkast erin met de stoffige achterkant naar binnen en de deur open naar buiten, en je verwarmt met een warmtepomp. De koelkast haalt warmte uit de buitenlucht en geeft die af aan het zwarte rooster achterop. Het voordeel is de opbrengst. Voor één deel elektriciteit krijg je drie delen warmte.'

Ik herinner me de sommetjes van de natuurkundelessen op de middelbare school over koelkasten. Je moest dan het rendement uitrekenen, dat wil zeggen: de gewenste hoeveelheid onttrokken warmte gedeeld door de hoeveelheid energie die dat had gekost. Daar kwam een getal van 130 procent uit. Ik was stomverbaasd, want een rendement van meer dan 100 procent is onmogelijk, had ik begrepen. Wet van behoud van energie: energie kan niet ontstaan of verloren gaan. Nee, dat niet. Maar je kunt kennelijk wel met een geringe hoeveelheid energiewarmte naar een hogere temperatuur transporteren. De bottom-line: het kost minder energie warmte te verpompen, dan het te produceren.

In de winter loopt de warmtepomp heel traag en constant, vertelt Niels Sijpheer. Door de dikke muren, het krypton-geïsoleerde glas, de warmteterugwinningsinstallatie en de kiervrije deuren en vensters, verliest de woning nauwelijks warmte. Ook het verschil tussen dag en nacht blijft daardoor beperkt. De woning heeft nauwelijks warmte nodig. Is dat niet duur, vraag ik me af. Hoeveel procent duurder ben je uit met de genomen isolatiemaatregelen? Daar heeft Niels geen antwoord op. Hij benadrukt het langetermijnrendement van de isolatie en de uitgespaarde stookkosten. En wie kan de energieprijzen over twintig jaar inschatten? Bovendien is de opzet van de huizen experimenteel. Driedubbele kryptonruiten zijn niet bepaald een standaardprodukt, net zomin als dubbeldikke muren. Deze huizen zijn vast fors aan de prijs geweest, maar dat zegt weinig over hoeveel ze zouden kosten als er een hele woonwijk volgens dit plan gebouwd zou worden.

Duurzaam kantoor

Tussen Driebergen en Zeist, op het bijna twee eeuwen oude landgoed Schoonoord, is eind 2006 het eerste CO_2-vrije kantoor van Europa in

gebruik genomen. Op die plek stond eerst een kantoorgebouw uit de jaren vijftig. ‘Een somber gebouw met de hoofdingang aan de noordzijde,’ zegt architect Thomas Rau, die het nieuwe onderkomen voor het Wereldnatuurfonds heeft ontworpen. ‘Het was een pand met veel strakke en zakelijke lijnen. Het miste de dimensie van gevoel.’

Om daarvoor ruimte te maken liet Rau het middendeel slopen en verving het door een gigantische ronde zwartbetegelde vorm, de Blob. Van buiten doet die het meest denken aan het achteraanzicht van een enorme olifant. Binnen is de Blob het kloppend hart van het gebouw. Hier kom je binnen, nu over een bruggetje vanaf de zonnige zuidzijde, en dan sta je meteen middenin het gebouw. De drie verdiepingen van de drie vleugels van het kantoor komen hier samen in één open ruimte. Een brede, gekromde trap met leuningen van bamboe (FSC goedgekeurd) nodigt uit om het gebouw te verkennen.

FIG.77 Het eerste CO_2-vrije kantoor van Europa.

Ik krijg een rondleiding van Jan van den Bremer die namens het WNF de bouw heeft gecoördineerd. Hij is van alle gebruikte techniek op de hoogte en ik wil graag weten hoe een kantoor CO_2-vrij kan functioneren. Je hebt immers energie nodig om het gebouw te verwarmen of te koelen en elektriciteit voor de verlichting en de computers. Hoe doen ze dat hier?

De temperatuur in het gebouw moet zoveel mogelijk constant blijven. Daarom is de invloed van buiten zoveel mogelijk teruggebracht door het gebruik van superisolerend drievoudig glas en door ver uitstekende ho-

rizontale houten lamellen boven de ramen aan de zuidzijde. Dat houdt 's zomers de warmte buiten en het voorkomt hinderlijke schittering op de werkplek.

Teveel aan warmte wordt voor het grootste deel (75 procent) door een warmtepomp aan het gebouw onttrokken en opgeslagen in de bodem. Opvallend is dat er nergens radiatoren te zien zijn. In plaats daarvan zijn matten met dunne buisjes in de plafonds verwerkt, vertelt Van den Bremer. Daar stroomt water doorheen voor koeling of verwarming. De plafonds zijn vervolgens, net als de muren, gestucd met leem. Een vrij nieuw materiaal in de bouw dat volgens leemstucer Charles Thuijls belangrijke voordelen heeft: 'Door het grote vermogen van leem om warmte en vocht op te nemen, worden temperatuurverschillen afgevlakt.' Natuurlijke, gecontroleerde ventilatie zorgt voor de rest van de koeling.

In de winter komt een kwart van de warmte uit de warmtepomp die de warmte onttrekt aan het ondergrondse buizenstelsel. Het grootste deel van de warmte komt echter vrij als bijproduct van opwekking van de elektriciteit met een warmtekrachtinstallatie die op plantenolie draait (en dus CO_2 vrij is). De wkk-installatie levert 60 procent van de stroom. De rest komt van zonnecellen (20%) en van het openbare elektriciteitsnet (eveneens 20 procent groene stroom).

'CO_2-vrij' betekent dus nog niet 'energieonafhankelijk' of 'autonoom'. Er is immers plantenolie nodig voor de wkk-installatie en er is een uitwisseling van stroom met het elektriciteitsnet. Dat ligt in lijn met toekomstvisies op de stroomvoorziening zoals die nu ontwikkeld worden. Die gaan uit van flexibele netwerken tussen cliënten die het ene moment producent en even later afnemer kunnen zijn.

Het nieuwe WNF-gebouw is gemaakt met de beschikbare technologie, beseft Van den Bremer. Het is in die zin niet dé oplossing voor milieubewuste bouw. 'We kunnen slechts bouwen met de wijsheid van nu. Nu onze nek uitsteken en open blijven staan voor verandering.'

De ironie is dat de geavanceerde techniek voor de gebruikers van het gebouw onzichtbaar is. Geen radiatoren, geen airconditioners en weinig deuren. Maar ze ervaren wel het klimaat. Van den Bremer: 'Het is alsof natuur en gebouw met elkaar verbonden zijn.'

In april 2007 kreeg het WNF door het ministerie van VROM de NET-trofee uitgereikt. Dat is een prijs voor bouw- en renovatieprojecten die uitblinken in een energiezuinige aanpak.

Eén huis verder wordt een andere vorm van verwarming onderzocht: een cv-ketel met ingebouwde stroomgenerator. Koppeling van verwarming en stroomopwekking heet warmtekrachtkoppeling, een huisinstallatie: micro-wkk. We gaan naar binnen. Er liggen grijze plavuizen op de vloer, er staat een leren bank, een salontafel en een televisie. Je zou het zo als vakantiewoning willen huren, als het niet achter bewaakte hekken stond. Achter de bank een antracietkleurige kast ter grootte van een forse brandkast. Die zou je normaal niet in je woonkamer willen hebben. Grappig genoeg heet het apparaat micro-wkk. Wanneer dit apparaat heet water voor de douche maakt, wordt als bijproduct 3 kilowatt stroom geproduceerd. Genoeg voor zeven gemiddelde huishoudens. Maar wat als de douche uitgaat? Zit dan iedereen in het donker?

Bij dit soort vragen leeft Niels Sijpheer helemaal op. Centrales zullen overbodig worden, denk hij. De elektriciteit komt bij de buren vandaan, of bij de boer of bij de kwekerij of de afvalverbranding of van de windmolens. Een lappendeken aan leveranciers die een netwerk van individuele gebruikers van elektriciteit moet gaan voorzien. Dat kan niet goedgaan, denk ik dan. Niels blijft opgetogen. Computers zullen de steeds wisselende vraag en aanbod bij elkaar brengen met als gevolg een fluctuerende energieprijs. Je huiscomputer beslist wanneer het tijd is om de was te draaien, namelijk wanneer de prijs per kilowattuur onder een ingestelde waarde komt. ik heb moeite me voor te stellen hoe zo'n dynamisch systeem waarin deelnemers zowel producent als gebruiker zijn met steeds wisselende energievraag en prijzen, hoe zoiets stabiel kan blijven. Hoe zeker je ervan kunt zijn dat het licht blijft branden en dat de computers het blijven doen. Dat blijken de kernvragen te zijn van een nieuw vakgebied genaamd 'virtual power plants'.

Het duizelt me een beetje als we de deur achter ons dichtdraaien. Geen gasaansluiting meer, of misschien ook wel en dan ben je gelijk een buurtcentrale. Zullen we de huidige kolen- en gascentrales van 600 megawatt of meer als prehistorische kolossen gaan zien, als de dinosauriërs van de energievoorziening. Of zullen we nog heimwee gaan krijgen naar een stabiele en zekere levering van gas en elektriciteit tegen een vastgestelde prijs?

Stroomloos in castricum

Een modelwoning met verwarmingselementen als bewoners is één ding, maar hoe is het om in zo'n huis te wonen? Er is in Nederland één gezin met die ervaring: de familie Sjoerdsma in Castricum. De provincie Noord-Holland wilde destijds een demonstratiewoning met zonnepanelen inrichten om aan te tonen dat zonnepanelen op het dak voldoende elektriciteit zouden leveren om van rond te komen. Bovendien wilde men weten hoe zo'n zonnehuis, met alle technische voorzieningen die daarbij horen, in de loop der jaren zou functioneren. Men koos ervoor om zo dicht mogelijk bij de praktijk te blijven. Dus niet een speciaal huis bouwen, maar uit te gaan van een nieuwbouwrijtjeshuis. Evert Sjoerdsma was bij de ontwikkeling betrokken en was geïnteresseerd om het huis te bewonen. Prins Claus opende het zonnehuis in 1989 en Sjoerdsma woont er nog steeds. Zonder stroomaansluiting, maar wel met gas.

Evert Sjoerdsma heeft de deur van zijn werkkamer annex ontvangstruimte open staan als ik aankom. Een slanke vijftiger met gegroefd gelaat, dun metalen brilletje en steil grijzend haar. Een zachte stem, maar vol gedrevenheid. In zijn boekenkast staan naast boeken over energieprojecten veel boeken over zeilen en over maritieme geschiedenis. Deze man gelooft in zon en wind. Dat is ook duidelijk wanneer hij vertelt over zijn andere projecten. Hij heeft na zijn periode bij de provincie bij ECN in het nabijgelegen Petten gewerkt en is nu freelance-energieconsulent. Vooral educatieve projecten hebben zijn belangstelling. Enthousiast vertelt hij over het project op het NDSM-eiland in Amsterdam-Noord. In een omgeving van kleine bedrijfjes en kunstenaars is hij daar bezig met plannen om energie voelbaar te maken voor bezoekers. Kinderen mogen afgewerkte frituuurolie ophalen en die in een tractor gieten. Kunnen ze zelf ervaren dat een tractor die op plantaardige olie loopt naar frietjes ruikt. Of ze kunnen 10 cent verdienen door met z'n allen een kilowattuur op te wekken door aan een grote installatie te draaien (Dat zal overigens niet meevallen: voor 100 watt vermogen moet je al behoorlijk hard werken. Dat moet je dan dus met z'n tienen een uur volhouden).

Misschien krijgen ze hulp van een andere vinding: het droogdok. Het dok, een diepe kuil in het water, wordt met windstroom leeggepompt. Als het dan weer volloopt met water dat door een turbine stroomt, levert dat weer stroom op. Sjoerdsma maakt het ongrijpbare begrip energie graag concreet.

FIG.78 Zonne-pionier Evert Sjoersma. – Foto:JW

Voordat hij het huis in Castricum kon betrekken, was al duidelijk dat hij het huiselijke energieverbruik drastisch moest terugbrengen. De panelen waarmee het zuidelijke deel van het dak bedekt is leveren maximaal 2,5 kilowatt, maar door het jaar heen is de gemiddelde opbrengst 1720 kilowattuur. Het gemiddelde Nederlandse jaarverbruik in 1989 was 2200 kilowattuur (en in 2005: 3.346 kilowattuur), dus het verbruik moest terug. Zeker met het oog op de winter wanneer het verbruik hoog is, maar het aantal zonneuren beperkt en de straling zwakker.

Sjoerdsma zoekt tussen zijn presentatiedia's het plaatje met het energie-overzicht. Het verbleekte plaatje (al veel lezingen gehouden) laat zien hoe hij het stroomverbruik heeft teruggebracht tot een kwart van het gemiddelde. De grootste winst komt uit de verlichting: van 700 naar 160 kilowattuur door het gebruik van spaarlampen. Ventilatie gebruikt slechts 175 kilowattuur in plaats van de gebruikelijke 500 door het gebruik van een zuinige centrifugaalpomp en dankzij de aanleg van bredere buizen waardoor de lucht minder wrijving ondervindt. De wasmachine gebruikt slechts 10 procent van wat gebruikelijk is (330 kilowattuur op jaarbasis) doordat het water niet elektrisch verwarmd wordt, maar met een geiser. Een andere flinke besparing is de verwarming. De elektronica en de pomp van een cv-ketel zijn goed voor 250 kilowattuur

per jaar. Sjoerdsma realiseerde zich dat een cv-ketel hem de helft van zijn beschikbare stroom zou kosten. Hij koos voor een andere oplossing: een dubbele isolatie van de spouw en 12 centimeter schuim onder het dak, en twee gevelkachels die het huis verwarmen. Eén in de woonkamer, de andere in de hal voor de rest van het huis. Een perfect systeem volgens Sjoerdsma, 'maar mensen geloven niet dat een huis zonder centrale verwarming kan bestaan.' De koelkast tenslotte gebruikt volgens het plaatje helemaal geen stroom. Dat vraagt om toelichting. In de zomer draait de koelkast op het overschot aan elektriciteit van de zonnepanelen, gratis dus, en in de winter op gas. Al met al verbruikt de familie Sjoerdsma slechts 535 kilowattuur per jaar, nog geen 20 procent van het huidige gemiddelde huishouden. De gasrekening is, ondanks de bijzondere voorzieningen, vergelijkbaar met de buren. Vandaar de stelling van Sjoerdsma dat ieder huishouden met een beetje moeite zijn stroomrekening kan halveren.

De stroom komt dus van het dak met een maximaal vermogen van 2,5 kilowatt. Maar als de zon schijnt heb je niet veel stroom nodig, dus moet je de energie opslaan. Als stroom of als warmte. Sjoerdsma doet dit met twaalf auto-accu's voor de stroom en wat er dan nog over is gaat naar een elektrische boiler. In huis draaien de meeste toepassingen op 24 volt gelijkspanning, een converter zet de accuspanning om naar 220 volt voor apparatuur die netspanning nodig heeft. In de zomer voldoet het systeem ruimschoots en haalt dan een rendement van 70 procent. Met andere woorden: er gaat 30 procent van de zonnestroom verloren door overcapaciteit 'Dat is warmte voor de vogeltjes,' zegt Sjoerdsma. Volgens deskundigen van Senter-Novem is 70 procent een zeer hoog rendement voor een niet aan het net gekoppeld systeem.

Het probleem zit natuurlijk in de winter. Wat doe je als het dagenlang grijs en nevelig blijft en de accu's uitgeput raken? Daarvoor staat er in de hoek van de ruimte een kleine rode Honda-generator die 500 watt levert. Oorspronkelijk liep het ding op benzine, maar nu op aardgas. 'Hij start alleen wel beroerd,' vindt Sjoerdsma. Gemiddeld 80 uur per jaar loopt de brommer om de accu's op te laden.

Ik zou graag weten hoe tevreden mevrouw Sjoerdsma is met het leven in het zonnehuis. Helaas heeft ze slecht geslapen en heeft ze niet veel zin in een interview. Moet je je bepaalde dingen ontzeggen, vraag ik haar. Eigenlijk niet veel, vindt ze. Ze hebben geen magnetron, maar daar zat ze ook niet op te wachten. En als je een was draait moet je er in het begin en aan het eind even bij zijn om de thermostaatkraan te

verdraaien. De wasmachine is van het 'hot-fill'-type. Dat wil zeggen dat je zelf warm water moet toevoeren, want de machine heeft geen verwarmingselement (dat scheelt 90 procent van het verbruik). Tijdens de voorwas staat de kraan dus op koud, dan draai je naar zeg 60 graden, en tegen het eind weer naar koud. Een kwestie van er even bij blijven voor het beste resultaat.

Zeventien jaar lang al geen stroomrekening. En al die tijd storingsloos. De techniek heeft zich bewezen, en de Sjoerdsma's hebben bewezen dat je comfortabel kunt leven met de helft tot driekwart minder stroom. In het begin waren mensen vaak huiverig. Stel je voor dat het systeem plat gaat, dan zit je toch mooi in het donker met een kaarsje. Het omgekeerde bleek het geval: in de afgelopen jaren hebben de Sjoerdsma's heel wat stroomstoringen gemist, want gemiddeld ligt in Nederlandse huishoudens een half uur per jaar de stroomvoorziening plat. Maar als in Castricum de stroom uitvalt, brandt in het zonnehuis nog altijd het licht.

Zweetenergie

Malende benen, rode koppen en zwoegende boezems. In een sportschool dringt zich makkelijk de vraag op of alle energie die daar vrijkomt nuttig gebruikt kan worden. Zo vertelde mijn moeder dat er in de oorlog 's avonds altijd iemand op een omgebouwde fiets moest trappen om licht te maken, zodat vijf of zes anderen dicht opeengepakt konden lezen. Na een tijdje werd er gewisseld.

Ruim zestig jaar later is elektriciteit uit zweet weer even wereldnieuws. De *Wallstreet Journal* schrijft over de *California Fitness health club* in Hong Kong, waar de sporters stroom opwekken. Sportman en energiefanaat Doug Woodring kwam op het idee om de fietsen en de stepapparaten te voorzien van een dynamo. Er zit meestal al een kleintje op om het display van stroom te voorzien. Woodring werkte samen met de Italiaanse uitvinder Lucien Gambarota om bij 13 machines de kleine dynamo's te vervangen door grotere generatoren en die aan te sluiten op spaarlampen boven de toestellen. De clubketen betaalde de ombouw en voorzag de machines van een waarschuwingsbord: *'Please don't cause our excercise machine to catch fire'*. Zo'n vaart zal het niet lopen, want als alle dertien machines in

gebruik zijn, is het totale geleverde vermogen ongeveer 300 watt. Om een magnetron aan de gang te houden heb je dus wel dertig mensen nodig die zich in het zweet werken.

Dichter bij huis kwam de Nederlands-Chileense organisatie Enviu voor duurzame innovatie met het idee van de duurzame dansvloer. Het podium meet zes bij zes meter en het werd eind 2006 in Rotterdam gepresenteerd. De vloer is voorzien van piëzoelektrische kristallen die stroom geven wanneer ze vervormen. Hoe harder je stampt, hoe meer stroom. Maar tot nu toe is de opbrengst alleen toereikend voor een aantal lampen in de vloer.

Toch komen er steeds meer apparaten die menselijke energie omzetten in elektriciteit: LED-zaklantaarns die je moet schudden voor gebruik of opwindradio's. Er is militair onderzoek geweest naar generatoren in de hakken van schoenen of naar een op en neer deinende rugzak die ook stroom leverde (vermogen: 15 watt). Allemaal erg handig als er niks anders in de buurt is, maar veel levert het niet op.

De mens zelf levert namelijk niet zo gek veel energie: 100 watt aan warmte en ongeveer hetzelfde aan spiervermogen. Veel apparaten in de sportschool laten zien hoeveel vermogen je levert. Bij lage inspanning ligt dat sportvermogen gemiddeld tussen 75 en 125 watt. Bij wat moeite kan dat oplopen tot 200 tot 300 watt. Het piekvermogen kan veel meer zijn (tot 1000 watt), maar dat duurt hooguit een halve minuut. Ter vergelijking: een paardenkracht (wat eigenlijk paardenvermogen had moeten heten) is 746 watt, en daarmee twee keer meer dan een gemiddeld paard over langere tijd kan leveren. Een beetje auto heeft een motorvermogen van 150 pk.

Terug naar de mens met zijn eigen bescheiden vermogen van ongeveer 100 watt. De mens heeft zich in de loop van de twintigste eeuw omringd met steeds meer hulpvermogen. UvA-hoogleraar milieukunde Lucas Reijnders heeft daar de term energieslaafjes voor bedacht: iedere 100 watt staat voor 1 slaaf. Inmiddels heeft iedere Nederlander de beschikking over gemiddeld 70 energieslaafjes (inclusief verwarming en vervoer). Dat is meer dan het Europees gemiddelde (50), maar minder dan de gemiddelde Amerikaan (110 slaven). De gemiddelde wereldburger heeft 19 slaafjes tot zijn beschikking, rekende Reijnders uit.

Power-matching

FIG.79

'Elektriciteitsnetten worden intelligente systemen die, ondersteund door geavanceerde informatietechnologie, flexibele en gecontroleerde hoeveelheden stroom transporteren.'

European SmartGrids Technology Platform: Vision and Strategy

Stroom verkopen doe je zo

Er staat ons een revolutie te wachten in de stroomvoorziening. Is het tot nu toe zo dat 28 grote centrales Nederland van stroom voorzien, in de toekomst komen daar duizenden en misschien wel miljoenen kleine stroombronnen bij. Windmolenparken, vergistinginstallaties bij boeren en zuiveringsbedrijven, industriële warmtekrachtinstallaties, stroomleverende cv-ketels, zonnepanelen en tal van andere kleine energiebronnen gaan hun steentje bijdragen. Maar dat vraagt wel om een compleet ander elektriciteitsnet. De elektriciteitsnetten die we nu hebben, zijn over een periode van meer dan honderd jaar geëvolueerd naar tamelijk betrouwbare systemen (gemiddeld een half uur per jaar plat) die de stroom van de centrale via hoogspanningsnetten en verdeelstations, transformatorhuisjes en meterkasten naar de afnemers brengen. Het zijn technische hoogstandjes met een hoge mate van betrouwbaarheid, maar ze zijn niet ingericht op de toekomst.

Het net van de toekomst is ingericht voor tweerichtingsverkeer, kan snel reageren op veranderende vraag en aanbod en het kan de energiebehoefte ook sturen. Intelligentie en flexibiliteit zijn de kernwoorden. Men spreekt over *smartgrids* (slimme netwerken), over virtuele elektriciteitscentrales en *agents* die ons 24 uur per dag vertegenwoordigen op de elektriciteitsmarkt en de stroom in- en verkopen tegen de meest gunstige tarieven.

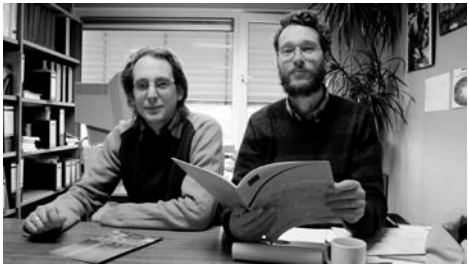

FIG.80 Op het ECN buigen Maarten Hommelberg (l) en Frans Nieuwenhout zich over de stroomnetwerlen van de toekomst: SmartGrids. – Foto: JW

Ik vind het een intrigerend idee, al kan ik me er niet echt iets bij voorstellen. Daarom ga ik op bezoek bij de groep intelligent energiemanagement van ECN in de duinen bij Petten. Ik kom terecht in een kleine kantoortje in een langwerpig noodgebouw met twee verdiepingen. Een iets te grote tafel met verschillende stoelen er omheen en plastic bekertjes koffie uit de automaat. Mijn gastheren zijn Frans Nieuwenhout, 49 jaar oud – collega's vinden dat hij opvallend lang 49 is – en Maarten Hommelberg. Nieuwenhout is een lange slanke man met donker golvend haar (met grijze streken) en een kinbaardje. Hij praat zacht, verzorgd en bedachtzaam en draagt een donkere trui. Hij is hier de groepsleider. Maarten Hommelberg ziet er met zijn bruin met beige trui, halflang haar en een stalen brilletje uit als het prototype van een ingenieur. Hij is hier wetenschappelijk medewerker. Samen nemen ze de tijd om me in te leiden in de stroomnetwerken van de toekomst.

Op dit moment wordt de balans tussen vraag en aanbod bepaald door de grote centrales, legt Nieuwenhout uit. Die balans is nodig omdat je elektriciteit niet kunt opslaan. Centrales regelen die balans door meer of minder stroom te leveren, naar gelang van de vraag. Dat werkt goed, maar er komt steeds meer elektriciteit het net op waar de grote centrales geen vat op hebben. Die zogeheten decentrale opwekking dekt nu al een kwart van de elektriciteitsvraag in Nederland. Dat is stroom die opgewekt wordt in grote warmtekrachtinstallaties in de industrie of bij tuinders. De installatie gaat aan wanneer er warmte nodig is, en de stroom wordt opgewekt als bijproduct. Het aandeel van wkk-installaties is zo groot omdat de overheid warmtekrachtkoppeling stimuleert vanwege de veel grotere efficiëntie.[145] Je maakt immers warmte èn stroom, terwijl een conventionele centrale alleen stroom levert en de warmte loost. De grote centrales weten hoeveel vermogen er her en der verspreid staat, maar niet wanneer die stroom gaan leveren. Want dat bepaalt de eigenaar van de installatie zelf. Men verwacht dat het centrale deel in de toekomstige stroomvoorziening kleiner zal worden en het decentrale deel groter, waardoor de vertrouwde manier van het bijregelen van centrales om vraag en aanbod in balans te houden niet langer werkbaar zal zijn.

De oplossing wordt gezocht in de zogenaamde virtuele elektriciteitscentrale. Dat is een koppeling van een aantal kleine stroomopwekkers die zich als een centrale gaan gedragen. Ze gaan stroom leveren als daar vraag naar is. Maar wat als een tuinder met wkk-installatie op dat moment helemaal geen behoefte heeft aan warmte? Waarom zou hij dan toch zijn installatie gaan starten? Dat is het ingewikkelde, geeft

Nieuwenhout toe. Verschillende spelers hebben verschillende belangen. Een oplossing zou kunnen zijn dat de tuinder de warmte die hij op dat moment niet nodig heeft opslaat in een buffer.

In de praktijk zal het echter niet de tuinder of de papierfabrikant zijn die beslist of de installatie gaat draaien, maar een *agent*. Een *agent*, vertelt Hommelberg, is een programma dat op de hoogte is van de capaciteit van de installatie en van de wensen van de eigenaar en die namens de eigenaar handelt op de energiemarkt. 'Een *agent* doet biedingen op de stroommarkt. Hij zegt hoeveel hij wil uitgeven of ontvangen voor elektriciteit.' Dus in het geval van de tuinder die niet op warmte zit te wachten, zal de *agent* pas stroom gaan produceren als de vraagprijs hoog genoeg is. Dan kan het lonend zijn om de warmte in de tussentijd maar even op te slaan, of desnoods te lozen.

Het marktprincipe als regulator is in 2005–2006 uitgeprobeerd in een veldtest onder de naam CRISP (*Critical Infrastructures for Sustainable Power*). Twee windmolenparken, een warmtekrachtinstallatie van een appartementencomplex, een koudeopslag, een noodaggregaat en een woonhuis met een stroomleverende combiketel werden samengevoegd tot een virtuele centrale. Iedere unit stond via een *agent* (een computer waarop het programma draaide) in verbinding met de zogenaamde *PowerMatcher*. Na een jaar tijd bleek het principe goed te werken. Over- en onderproductie van de windparken weerspiegelden zich in een lage respectievelijk hoge stroomprijs (de prijs mocht variëren tussen 5 en 10 cent per kilowattuur). Andere *agents* reageerden op de veranderde stroomprijs en schakelden uit of juist in. De *agent* in het woonhuis bijvoorbeeld wachtte met het opwarmen van de boiler tot de stroomprijs voldoende hoog was. Stroom ontstaat als bijproduct in de microwarmtekrachtinstallatie en wordt dan tegen een gunstig tarief geleverd. Het netto-effect was dat de onbalans (het verschil tussen vraag en aanbod) in het netwerk met 25 procent afnam. Intelligente *agents* maakten de decentrale opwekking tot een zelfregulerend systeem met de schommelende stroomprijs als spil waar alles om draait.

Wordt dat nooit een chaos, vraag ik me af. 'Ehhh, nee,' reageert Hommelberg verbaasd. En hoe groot kan zo'n systeem worden? Daar is volgens hem geen grens aan: 'Je kunt lokaal een markt beginnen, daarboven weer een markt en weer een marktniveau. Je verzamelt de biedingen en geeft ze door aan het bovenliggende niveau.'

Toch heb ik moeite me dat voor te stellen. Denk je eens in dat je in een wijk woont waar veel bewoners een micro-wkk hebben (het ministerie

van Economische Zaken heeft er een mooie naam voor bedacht: de toverketel). Dan staat iedereen tussen zes en acht uur op en overal gaan die installaties draaien. Wat dan? Grote kans dat er meer stroom opgewekt wordt dan de wijk aankan. Dat moet je opvangen, zegt Frans Nieuwenhout, en dat betekent dat er een mate van flexibiliteit voor nodig is.

Flexibiliteit blijkt een kernwoord in de intelligente netwerken. Het betekent niet dat een deel van de wijk maar eventjes moet wachten met douchen, maar wel dat de installaties gespreid gebruikt worden. Een voorbeeld. Door de inzet van micro-wkk's is warmteproductie gekoppeld aan stroomopwekking. Maar er is tussen beide energievormen een groot verschil: warmte is eenvoudig op te slaan, elektriciteit niet. Als ik de woonkamer om half acht 's ochtends graag op 18 graden heb, dan is daar warmte voor nodig met als bijproduct elektriciteit. Als mijn toverketel een half uurtje van te voren aangaat, net als veel van die apparaten in de wijk, zal het stroomtarief laag zijn, doordat het aanbod hoog is en de vraag klein. Het is dus slimmer om de warmte eerder te produceren wanneer de stroomprijs nog hoger ligt. Gelukkig hoef ik daar zelf niet voor te zorgen, want dat doet de *agent* terwijl ik me nog eens omdraai. Nieuwenhout vat het als volgt samen: 'Je hoeft geen elektriciteit te produceren als je warmtevraag hebt, als je een deel van de warmtevraag kunt verschuiven. Bijvoorbeeld door opslag van warmte voor de douche in een boiler.' Er zijn natuurlijk grenzen aan. Als je boiler leeg raakt, dan moet de ketel gaan draaien voor extra warmte. Dat is niet erg, maar de stroom zal weinig opleveren vanwege het heersende overschot op de markt. Flexibiliteit is een noodzakelijke basis om te kunnen sturen.

Dus als ik flexibel ben, dan ben ik goedkoper uit? Nieuwenhout beaamt dat: 'Dat is het basisidee. De waarde van elektriciteit varieert enorm door de dag. Als kleinverbruiker merk je daar niet veel van en heb je tot nu toe alleen te maken met het dag- en nachttarief. Maar de kosten voor de energiesector variëren enorm. 's Nachts draaien de goedkoopste eenheden en is de vraag laag en dus de stroom goedkoop. Overdag is de vraag veel hoger en stijgt de prijs, want op ieder moment moet vraag en aanbod met elkaar in evenwicht zijn. Producenten zijn er goed in geworden om in te schatten hoe groot de vraag zal zijn, maar er moet altijd een beetje op- of afgeregeld worden en daar hangt een prijskaartje aan. Bij meer vraag dan verwacht stijgt de prijs sterk. Het idee achter de virtuele centrale is dat je met snel regelbare eenheden op die prijsstijging kunt inspelen. Je schakelt in wanneer de prijs hoog is en niet wanneer die laag staat.

De fluctuaties in stroomprijzen zullen in de toekomst nog groter worden, zeker wanneer er veel windturbines zijn aangekoppeld. Als de plannen doorgaan om in 2020 zesduizend megawatt aan windenergie te hebben staan, dan draait 's nachts bijna het hele land op windturbines. Als dan de wind onverwacht wegzakt, heb je snel flexibele opwekkers nodig om aan de vraag te kunnen blijven voldoen.' Dan schieten dus her en der verwarmingsketels aan, ook als is het drie uur 's nachts.

In een tweede praktijktest is gekeken hoe negen micro-wkk-ketels bij particulieren ingepast konden worden in een virtuele centrale. Daarvoor moesten de eigenaren wel de controle van hun installatie overdragen aan een *agent*. Maarten Hommelberg: 'We hebben kastjes gemaakt die met de installatie konden kletsen en met de thermostaat. Die kastjes stonden met elkaar in verbinding via internet. De bewoners draaien aan de thermostaat en wij maken gebruik van de bandbreedte. Ze hebben eerder op een internetpagina op moeten geven hoe flexibel ze zijn. Als ze 20 graden instellen, mag het dan misschien ook 19 of 21 graden zijn. Hoe flexibeler, hoe meer je verdient. Dat geeft de *agent* de ruimte om voor jou te handelen op de energiemarkt.'

Hommelberg heeft duidelijk plezier in de kunstmatige intelligentie van zijn *agents*. Enthousiast vertelt hij over de volgende stap: 'Je hebt ook *agents* die vooruit kijken en proberen te voorspellen wat jij wilt. Als je het om zeven uur warm wilt hebben in huis en om vijf uur is het stroomtarief gunstig, dan schakelt de *agent* alvast in. Het warmteverlies in twee uur tijd weegt dan op tegen het prijsverschil van de elektriciteit, of tegen het feit dat het een graadje kouder is dan anders. Het is iedere keer de marktwerking waar de regelresultaten uit voortkomen.'

Het doet me denken aan wat Henri Giesen, productontwikkelaar van Essent, me vertelde. In de toekomst zou Essent het liefst comfort verkopen, zei Giesen. In huis komt dan een apparaat te staan (een micro-wkk), waar de bewoners verder niets aan hoeven te doen. De installatie, die in eigendom blijft van het energiebedrijf, zou van afstand bediend worden. Gemak dient de mens. De klant kan zijn wensen kenbaar maken, maar wanneer het apparaat in- en uitschakelt ligt buiten zijn invloed. Ik begin nu te begrijpen waarom. Het is voor een energiebedrijf natuurlijk erg aantrekkelijk om een virtuele centrale – verdeeld over honderden of duizenden huizen – beschikbaar te hebben.

De sleutel voor zo'n systeem ligt in de intelligente stroommeter waar nieuwbouwhuizen al mee uitgerust worden. De meter heeft aparte aansluitingen voor inkomende en uitgaande stroom (ieder huishouden kan met micro-wkk of zonnepanelen immers energieproducent worden) en het legt ook het tijdstip vast, waardoor een veel preciezer tarief berekend kan worden aan de hand van de actuele stroomtarieven dan de huidige tweedeling in hoog en laag tarief. Dat maakt het volgens Nieuwenhout mogelijk om te meten wanneer iemand gebruikt of juist levert. 'Daardoor kun je iemand belonen als hij levert op het moment dat daar behoefte aan is. En de prijs is daarvoor het meest voor de hand liggende signaal.'

De virtuele centrale, intelligente stroomnetwerken en *power-matching*. Het zijn begrippen waar enkele jaren geleden nog niemand van gehoord had. Maar in 2005 werd het Europese technologieplatform *SmartGrids* opgericht en sindsdien zijn energiebedrijven, onderzoekers, netwerkbeheerders, hardwarefabrikanten en anderen met elkaar in gesprek om de stroomvoorziening in Europa op een nieuwe leest te schoeien. Er moet overeenstemming komen over tarieven, apparatuur, standaards en protocollen. In de toekomst zouden liefst alle energieopwekkende apparaten en stroomvreters in de Europese huishoudens met elkaar moeten communiceren over de stroomprijs. Dat vereist niet alleen flexibele internetachtige communicatie, maar ook goedkope en kleine kastjes. De technologie zou het mogelijk moeten maken om clusters te vormen van kleine energieproducenten – een *microgrid* – dat functioneert als een virtuele centrale en dat een onderdeel vormt van een heel netwerk van dergelijke clusters. Als de nood aan de man komt en het grotere stroomnet gaat plat, zou zo'n *microgrid* ook los daarvan moeten kunnen functioneren (in de zogenaamde eilandmodus) waardoor het systeem een soort taaie robuustheid zou krijgen.

Het directoraat (een Europees ministerie) voor wetenschap en onderzoek denkt dat zo'n flexibel stroomnetwerk de beste kansen heeft voor de toekomst: 'Tekort aan energiebronnen aan de ene kant en klimaatverandering aan de andere zullen waarschijnlijk grote invloed hebben op de investeringen in de energieopwekking. Het gaat hier niet over de keuze tussen grote centrales of kleine opwekkers, maar over de mogelijkheid om te profiteren van een breed scala aan energietechnologieën en het samengaan van veel mogelijke oplossingen.'[146] Het is wat Europees omslachtig geformuleerd, maar de richting is duidelijk: vanaf

een monolithische stroomvoorziening in het verleden naar een flexibel tweerichtingsnetwerk in de toekomst, waar alle denkbare vormen en grootten van energieopwekking in onder zijn te brengen. Of nog korter: van dekbed naar lappendeken.

Lievense revisited

In 1981 presenteerde ingenieur Lievense een geruchtmakend plan voor een energiebuffer. De energie van windmolens varieert met de wind en dat maakt het lastig windparken in te passen in het elektriciteitsnet. Lievense had daarvoor een oplossing bedacht: een vele meters hoge ringvormige dijk in het Markermeer met 400 windmolens van 1 tot 1,5 megawatt op de rand. In tijden van weinig vraag en veel wind zou de elektriciteit van de molens gebruikt worden om water vanuit het Markermeer in het ronde stuwmeer te pompen. Wanneer de vraag naar stroom zou stijgen, kon het water via turbines uit het stuwmeer stromen waardoor er stroom zou worden opgewekt. Zo moest dit spaarbekken de grilligheid van de windenergie afvlakken.

Het spaarbekken is er nooit gekomen. Er waren veel bezwaren van landschappelijke aard, men vreesde voor de gevolgen voor de ecologie in het Markermeer en het plan was duur. Maar doorslaggevend was misschien wel het horrorscenario van een dijkdoorbraak bij een gevuld bassin. Een kleine tsunami zou het gevolg zijn die, mits in de 'juiste' richting, Amsterdam voor een groot deel onder water zou zetten. Dat scenario, dat door de TU Delft in de opleiding waterbouwkunde nog steeds gebruikt schijnt te worden als een voorbeeld van waterrampen, was samen met de kosten de oorzaak ervan dat het plan onderop de stapel belandde.

Vijfentwintig jaar later gaan er geruchten over een plan Lievense II. Weer zijn er grote plannen voor windmolenparken ontwikkeld en dezelfde problemen met een variabel aanbod steken de kop op, alleen nu een maatje groter. Ingenieursbureau Lievense uit Breda werkt samen met Kema uit Arnhem aan een plan voor een nieuw en groter spaarbekken dat omgekeerd zou werken. Men gaat uit van een ringdijk van kilometers doorsnee op zee. In tijden van stroomoverschot pompt men het zeewater uit het bassin weg, om het door turbines terug te laten stromen als er tekort aan

stroom heerst. Men denkt aan een vermogen van minimaal 5 megawatt (tien keer zoveel als het oorspronkelijke plan) en een actieve periode van 10 uur voordat het bassin volgestroomd is. Als plaats is gekozen voor de kust van Zeeuws Vlaanderen. Daar zit een stevige kleilaag in de bodem die voldoende sterk geacht wordt om het gigantische spaarbekken op te bouwen. Misschien was Lievense gewoon wel te vroeg met zijn idee.

FIG. 81 Het hart van het energie-eiland van Lievense en Kema: de pompturbines in het dijklichaam. Tekening: Rudolf Das. Reproductie met toestemming van Kema.

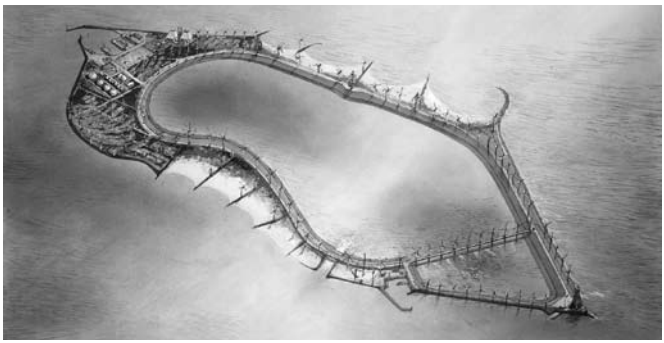

FIG. 82 Het energie-eiland van Lievense en Kema in vogelperspectief met links de energiehaven voor overslag van vloeibaar gas, aan weerszijden de stranden, en links een jachthaven en een viskweekvijver (naaktcultuur) en natuurlijk overal windmolens. Tekening: Rudolf Das. Reproductie met toestemming van Kema.

DEEL III

Lappendekens

'Klimaatverandering stuurt in de komende decennia de de economische ontwikkeling en de manier waarop we energie gebruiken.'

World Resources Institute[147]

'Eigenlijk wonen we in de verkeerde huizen, we werken in de verkeerde fabrieken en we rijden in de verkeerde auto's. Maar dat schakel je niet in één keer om. Dat kost decennia.'

Tim van der Hagen, hoogleraar reactorfysica TU-Delft

Ingenieurs en activisten

De vindingrijkheid om CO_2-vrije energie op te wekken en om energie te besparen is enorm. Opvallend is wel dat bijna veel van de projecten nog kleinschalig zijn. Afgezien van waterkracht, windenergie en biomassa zijn de bijdragen van andere duurzame energievormen onbeduidend, minder dan een procent van het totaal. In termen van een lappendeken aan energiesoorten, komen de meeste alternatieven niet verder dan een postzegelformaat. Niet denigrerend bedoeld, maar er moet nog veel gebeuren om duurzame energie een rol van betekenis te laten krijgen in de energievoorziening.

In de toekomst moet de uitstoot van broeikasgassen verminderen, maar het energieverbruik zal waarschijnlijk stijgen. Hoe is dat met elkaar te rijmen? In het najaar van 2006 verschenen daarover twee zeer verschillende Nederlandse energiescenario's. De *Smart Energy Mix* werd gepresenteerd op het najaarscongres van ingenieursvereniging KIVI NIRIA en de *Energy Revolution* was de tegenhanger van Greenpeace International. Beide rapporten gingen uit van een forse taakstelling in de CO_2-emissies: in vergelijking met 1990 een kwart tot 30 procent minder in 2025 tot zelfs 80 procent minder in 2050. Dat is dan ook meteen de enige overeenkomst tussen beide scenario's. De inschatting van de ontwikkeling van energieverbruik, de invulling daarvan en het achterliggende wereldbeeld zijn volkomen tegengesteld. Dat maakt het interessant ze eens tegenover elkaar te zetten.

De verwachtingen ten aanzien van het verloop van het energieverbruik staan lijnrecht tegenover elkaar. Het primaire energieverbruik (alles, inclusief transport en elektriciteit) stijgt volgens het KIVI tot 2050 met een kleine 20 procent, Greenpeace zet in op een daling met de helft. Het referentiescenario van het Internationaal Energie Agentschap IEA voorziet in Europa een geringe stijging van het primaire energiegebruik van 12 procent in 2030. Dat is redelijk in lijn met het KIVI-scenario, en het roept vragen op over de achtergronden van het Greenpeace-scenario.

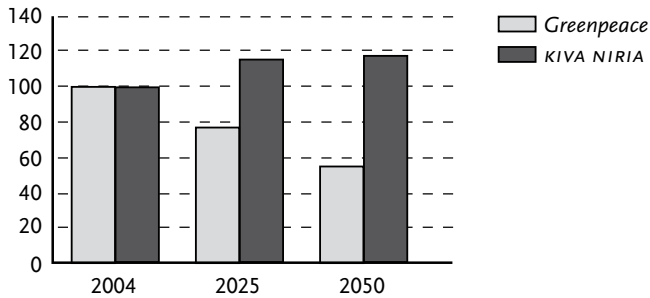

FIG.83 Prognoses voor totale Nederlandse energieverbruik in procenten tov 2004 volgens KIVI NIRIA en Greenpeace

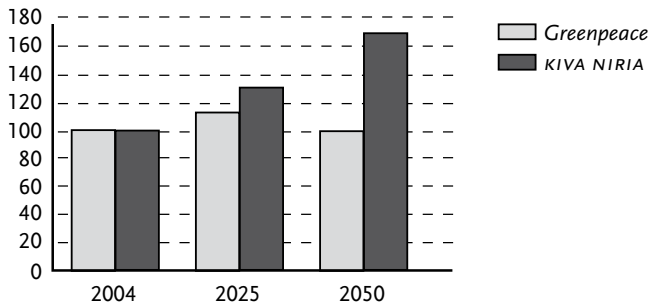

FIG.84 Prognoses voor totale Nederlandse stroomverbruik in procenten tov 2004 volgens KIVI NIRIA en Greenpeace

Over de uitgangspunten is het Greenpeacerapport *Energy Revolution* helder: om de temperatuurstijging als gevolg van het broeikaseffect tot twee graden te beperken, een doelstelling die ook Europees onderschreven wordt, moet de uitstoot van broeikasgassen uit geïndustrialiseerde landen met 30 procent terug (in vergelijking met 1990) tegen 2020 en met 80 procent tegen 2050. Wereldwijd moet de uitstoot 50 procent lager liggen dan nu, aldus het Greenpeacerapport. Ter vergelijking: het Stern-rapport schrijft dat de wereldwijde emissies met een kwart gedaald moeten zijn in 2050, anderen houden het op minimaal 30 procent emissiereductie wereldwijd.[148]

Daar komt bij dat Greenpeace Nederland de kerncentrale Borssele zo snel mogelijk wil sluiten en ook de kolencentrales. Met die opdracht is een groep van het *Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt* (DLR)

aan de slag gegaan. Ze kwam met een scenario waarin de kernwoorden zijn: *renewable energy sources* (duurzame energiebronnen) en *energy efficiency* (energiebesparing). Dat is natuurlijk geen toeval. Net als in huize Sjoerdsma te Castricum, zal ook in Nederland als geheel eerst het energieverbruik drastisch naar beneden moeten voordat duurzame bronnen de energiebehoefte voor een groot deel kunnen invullen. Greenpeace schrijft het zo: 'Het is cruciaal het grote potentieel aan efficiëntieverbetering te benutten. Dat is een voorwaarde voor het bereiken van een significant aandeel van duurzame energie in het primaire energiesysteem, om steenkool en kernenergie overbodig te maken en het verbruik van fossiele brandstoffen te verminderen.'[149]

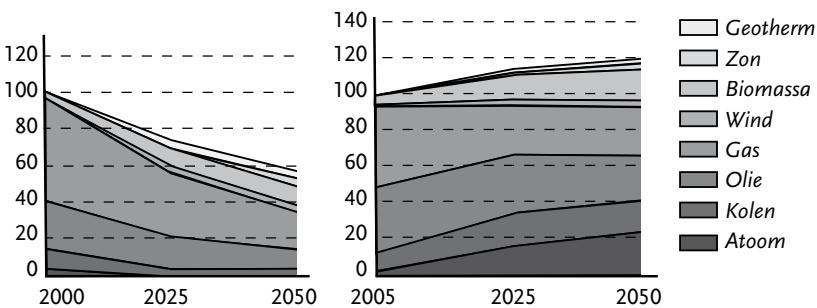

FIG.85 Primaire energiemix volgens Greenpeace (l) en KIVI NIRIA (r)

Greenpeace gaat voor 2050 uit van 45 procent vermindering van de primaire energie. Maar waar die besparing vandaan moet komen blijft onduidelijk.

Andere scenario's voorzien vaak juist een stijging van het energieverbruik. Het Internationaal Energie Agentschap IEA bijvoorbeeld gaat in het alternatieve scenario, dat gebaseerd is op de beleidsvoornemens van de G8-landen in 2006, uit van een kleine jaarlijkse groei van 0,3 procent en een percentuele stijging van het Europese primaire energieverbruik van 8 procent in 2030 (ten opzichte van 2004).

Maar door de inzet van meer duurzame energie daalt de CO_2 emissie van Europa wel tot 3 procent onder het niveau van 1990.[150] Volgens het Greenpeace scenario is de CO_2 emissie in 2030 al met ruim de helft afgenomen.

Het IEA baseert zijn alternatieve scenario op geformuleerd beleid in 2006 en berekent de gevolgen daarvan. Greenpeace begint aan de

achterkant en rekent terug. Greenpeace neemt de klimaatdoelstelling als uitgangspunt: de temperatuurstijging tot 2 graden beperken, wat betekent 30 procent minder CO_2-uitstoot (ten opzichte van 1990) van de geïndustrialiseerde landen in 2020 en 80 procent reductie tegen 2050. De 30 procent emissiereductie is in 2007 ook de Europese richtlijn, mits andere landen zich ook tot emissiebeperkingen verplichten. Vanuit 80% in 2050 en 30% in 2020 rekent Greenpeace terug naar nu en laat zien wat het traject is dat tot de gewenste klimaatdoelstellingen leidt.

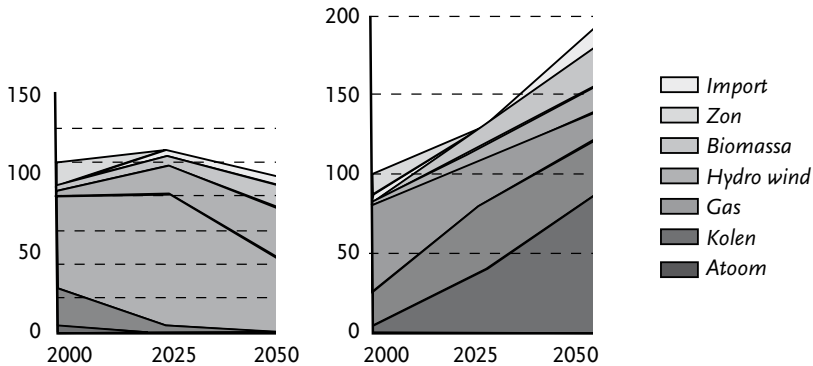

FIG.86 Energiemix elektriciteit Greenpeace(l) en KIVI NIRIA (r)

Voor elektriciteit gaat Greenpeace eerst uit van een kleine stijging (tot 16 procent in 2020), gevolgd door een langzame daling terug naar het huidige niveau in 2050. Ogenschijnlijk een vlak scenario, maar de revolutie voltrek zich onder het oppervlak. Atoom en kolen worden snel afgebouwd en het ontstane gat wordt opgevuld met aardgas. Greenpeace geeft de voorkeur aan aardgas boven kolen omdat de CO_2-uitstoot voor eenzelfde hoeveelheid energie 40 procent lager is. In 2025 komt bijna driekwart van de elektriciteit uit gasgestookte centrales, in 2050 is dat gedaald tot minder dan de helft. Van de rest wordt het grootste deel (30 procent van het totaal) ingevuld door windenergie. Biomassa (waaronder ook biogas) en zonnepanelen dragen 14 respectievelijk 7 procent bij. Verder voorziet het rapport in aanzienlijke (13 procent) import van duurzame elektriciteit, afkomstig van waterkrachtcentrales in Noorwegen en van zonnethermische centrales in Zuid-Europa en mogelijk Noord-Afrika. Samengevat: geen steenkool en kernenergie, energiegebruik in 2050 minder dan de helft van het referentiescenario dankzij grote

energiebesparingen. Greenpeace spreekt over 'negawatts' aan uitgespaarde centrales.

De beroepsvereniging van ingenieurs KIVI NIRIA kiest een heel ander uitgangspunt. Naast de voorwaarde van CO_2-vermindering gaan de ingenieurs uit van een sterk stijgende energievraag: 15 procent meer primaire energie en 30 procent meer elektriciteit in 2025 dan in 2005. In 2050 is dat 18 procent meer primair en 69 procent meer stroom. Die cijfers liggen redelijk in lijn met het IEA referentiescenario.[151] Verder vinden de ingenieurs het belangrijk dat 'de continuiteit van het energieaanbod gegarandeerd wordt, ook gezien de geopolitieke situatie.' De afhankelijkheid van olie dient dus te verminderen (van 38 procent in 2005 naar 20 procent in 2050). De energie moet betaalbaar zijn en blijven stelt het KIVI NIRIA. Dat betekent dat energiebesparing ingevoerd wordt voor zover die financieel rendabel is en ook hernieuwbare energie zoals afkomstig van zon, wind, biomassa en aardwarmte krijgen een kans 'zolang de kosten niet buiten proportie zijn'.[152]

Het plaatje wordt dan als volgt. De energievraag stijgt licht ondanks de continue besparingsprogramma's. Olie en gas worden gereserveerd voor de transportsector, huishoudelijk gebruik (we hebben in Nederland immers een ongekende infrastructuur op dat gebied) en voor de kleine industrie waarbij door warmtekrachtkoppeling tevens decentraal stroom wordt opgewekt. Biomassa heeft in de *Smart Energy Mix* een vergelijkbaar aandeel als in het Greenpeace-scenario en beperkte groeimogelijkheden (12 procent in 2025 en 14 procent in 2050) omdat we nu eenmaal in een klein land wonen, waar ook nog voedsel verbouwd wordt. Wel zien de ingenieurs mogelijkheden voor het gebruik van biomassa als grondstof voor de chemische industrie (in plaats van aardolie) en transport. Nieuwbouwwijken zouden uitgerust moeten worden met micro-wkk, warmte- en koudeopslag en passieve energiebesparingen. Hernieuwbare bronnen als zon, wind en aardwarmte leveren een beperkte bijdrage en blijven samen nog onder de 10 procent in 2050.

Nog duidelijker tekenen de keuzes in het ingenieursscenario zich af in de samenstelling van de stroomvoorziening. Waar Greenpeace inzet op gascentrales, kiest KIVI NIRIA ervoor om gas te reserveren voor huishoudens en transport. Het gevolg is dat er voor de sterk stijgende elektriciteitsvraag weinig gas overblijft (20 procent van de *Smart Energy Mix* in 2025 en 10 procent in 2050). De grote energiebronnen in het KIVI-scenario zijn steenkool en kernenergie. Het aandeel van steenkool

groeit aanvankelijk met de helft (van 21 procent nu naar 32 procent in 2030) en zakt dan weer terug (naar 20 procent in 2050). De ingenieurs gaan er vanuit dat steenkool een vrijwel CO_2-vrije brandstof wordt als men erin slaagt om 80 procent van de vrijkomende CO_2 af te vangen en voor eeuwig op te slaan. De capaciteit voor CO_2-opslag in de ondergrond is in Nederland groot, merkt het rapport op. Vijftig keer groter dan de huidige nationale CO_2-uitstoot van 22 miljoen ton per jaar. Met een beperkt aandeel van 20 procent steenkool in de energiemix kunnen we daar dus tot ver na 2050 mee toe, aldus de ingenieurs.

Maar de grootste bijdrage komt in het KIVI-scenario duidelijk van kernenergie. De ingenieurs willen voor 2025 twee flinke kerncentrales in gebruik stellen van 1600 megawatt elk (vier keer groter dan Borssele), daarmee voorziet Nederland dan voor 30 procent in de eigen stroombehoefte. Na 2025 voorziet KIVI NIRIA een verdere uitbouw van de nucleaire capaciteit zodat in 2050 ruim de helft van de stroom uit kerncentrales komt. De ingenieurs verwachten dat Nederland daar na 2025 wel rijp voor zal zijn. Sterker nog: Nederland zou zelfs een snelle kweekreactor willen. 'Gesteund door het bewustzijn dat het Nederlandse aardgas nu echt op is wordt een snelle kweekreactor gebouwd,' voorspelt het rapport *Smart Energy Mix*.[153]

Samengevat staan de ingenieurs te popelen om aan de snel groeiende energievraag te voldoen. De uitstoot van broeikasgassen willen ze daarbij beperken door grootschalige inzet van steenkool met CO_2-opslag en kernenergie, waaronder zelfs een snelle kweekreactor. Daarmee gaan ze in hun enthousiasme voorbij aan de wankele status die CO_2-opvang en opslag nog heeft. Het internationaal energieagentschap IEA houdt er om die reden nog geen rekening mee in de scenario's. Eerst maar eens tien kolencentrales wegzetten die er op commerciële basis mee draaien, schrijft het IEA.[154] Als dat werkt, stellen we onze scenario's bij. Want de techniek heeft wel een groot potentieel. Het KIVI NIRIA deelt de reserves van het internationaal energieagentschap niet en maakt CO_2-opslag tot hoeksteen van de *Smart Energy Mix*.

Hetzelfde geldt voor de inzet van een snelle kweekreactor. Bijna een halve eeuw geleden bedacht men de snelle kweekreactor als een nucleaire variant van de perpetuum mobile. Juist ingesteld kon de reactor meer brandstof leveren (in de vorm van plutonium) dan er aan uranium verbruikt werd. Nog afgezien van de giftigheid en de proliferatierisico's van plutonium bleek keer op keer de realisatie van een werkende snelle kweekreactor buiten bereik te liggen. Laat het net over de grens gelegen

pretpark *Kernwasser Wunderland*, voorheen snelle kweekreactor Kalkar in aanbouw, daar een herinnering aan blijven. Heel wat ingenieurs hebben zich verslikt in de snelle kweekreactor. Het doet daarom vreemd aan om uitgerekend die technologie hier gepresenteerd te zien als oplossing voor het klimaatprobleem.

Doe-het-zelf-scenario

Scenario's zijn de neerslag van keuzes. Sommigen daarvan worden nadrukkelijk voor het voetlicht gebracht, andere zijn alleen in de kleine lettertjes terug te vinden. Welke keuzes zou u zelf maken? Er moet iets gebeuren want de energievraag groeit, terwijl de CO_2-emissies naar beneden moeten. Met dat uitgangspunt schreven twee Amerikanen van de Princeton Universiteit in 2004 in *Science* een soort doe-het-zelf-scenario, dat uitnodigt om na te denken over de keuzes.[155]

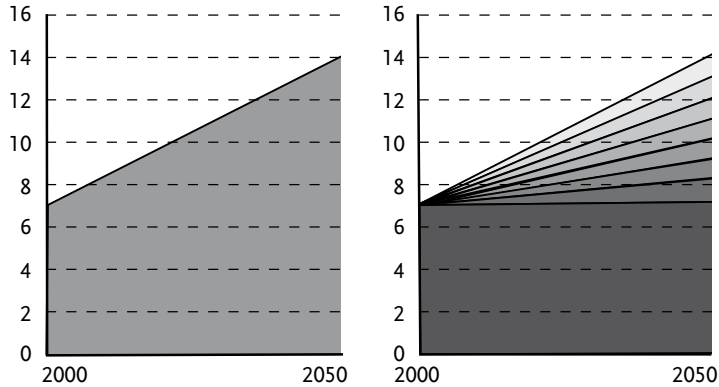

FIG.87 Koolstofuitstoot volgens referentiescenario in gigaton/jaar (l) en de stabilisatie daarvan met wiggen (r). Iedere wig neemt 1 gigaton jaarlijkse koolstofuitstoot in 2050 weg.

De oplossingen liggen klaar, schrijven de heren Pacala en Socolow. Alles wat we nodig hebben om het klimaatprobleem in de volgende 50 jaar te beheersen, is al ontwikkeld. We moeten het alleen inzetten en opschalen. Een oplossing in stappen voor het wereldwijde klimaatprobleem, want klimaat is nu eenmaal een globaal probleem. Voor de eenvoud hebben Pacala en Socolow de verwachte wereldwijde emissiegroei uit het referentiescenario samengevat als een rechte stijgende lijn vanaf een emissie van 7 gigaton koolstof in 2005 naar het dubbele, 14 gigaton, in 2055. Om de gemiddelde temperatuurstijging te beperken tot 2 graden

– een algemeen aanvaard maximum – moet de CO_2 concentratie in de atmosfeer niet hoger worden dan 450 tot 550 ppm. Ruwweg betekent dat, dat de jaarlijkse uitstoot niet groter mag worden dan de huidige 7.000 megaton koolstof[156] per jaar, dus dat de lijn in de grafiek vlak blijft lopen en niet stijgt. Socolow en Pacala delen vervolgens de driehoek tussen de gelijkblijvende emissie en het stijgende referentiescenario op in zeven gelijke wiggen, die ieder over 50 jaar een extra bijdrage van 1 gigaton CO_2 per jaar leveren. Stabilisatie van het klimaatprobleem vereist dan de eliminatie van zeven wiggen. In vergelijking met het referentiescenario zou dat tot 2055 een derde van de emissies voorkomen en de uitstoot van de energievoorziening in 2055 met de helft verminderen.

FIG.88- De vaders van de wig: Robert Socolow (l) en Stephen Pacala.
- Foto: Universiteit van Princeton

De afgelopen 30 jaar is de uitstoot van CO_2 ieder jaar met 1,5 procent gegroeid. Elk van de wiggen staat voor een vermindering van die groei met 0,2 procent. Overigens, als de uitstoot als gevolg van een forse ontwikkeling van de Aziatische economie opeens met 2 procent per jaar gaat toenemen, dan zijn zeven wiggen niet genoeg om stabilisatie te bereiken, dan zijn er wel tien nodig. Iedere wig moet in 2055 de uitstoot met 1 gigaton beperken, en tot die tijd 25 gigaton aan emissies vermijden. Dat zijn forse opgaven, maar Socolow en Pacala komen met een lijst van vijftien manieren waarop dat te bereiken is. Vijftien wiggen, waarvan er zeven nodig zijn om het klimaat te beheersen. De keuze is aan de politiek.

Vooral de laatste wig is verrassend. Wanneer een stuk bos of grasland als landbouwgrond in gebruik genomen wordt, komt daardoor de helft van de koolstof in de grond in de lucht terecht. Dat komt voornamelijk doordat het jaarlijkse omploegen onverteerd organisch materiaal in contact brengt met lucht waardoor de ontbinding sneller verloopt en CO_2 vrijkomt. Op die manier zijn in de historie al 55 gigaton koolstof (twee

wiggen) door landbouw in de lucht gebracht. Afzien van omploegen en in plaats daarvan zaden met een grondboor inbrengen kan het koolstofverlies aanzienlijk beperken, zeker als daarnaast ook bodembedekkende planten worden gebruikt om de ondergrond af te schermen. Volgens Socolow en Pacala werd in 1995 deze duurzame landbouw al toegepast op 110 miljoen hectare (van de 1600 miljoen hectare wereldwijd).

De charme van deze studie is zijn concreetheid. De meeste opties zijn al eerder langsgekomen, maar niet in deze grootte. De verdienste van Socolow en Pacala is dat ze laten zien dat de mogelijkheden om het klimaat te stabiliseren op de plank liggen. We hoeven niet op een wonder te wachten en kunnen gelijk aan de slag. Maar tegelijk maken ze duidelijk dat duurzame energievormen in de komende vijftig jaar een enorme opschaling zullen moeten doormaken, in de orde van tien tot honderden malen, om daadwerkelijk een impact te hebben op de klimaatverandering.

Sommigen zullen kernenergie afwijzen, anderen griezelen bij het vooruitzicht van monoculturen tot aan de horizon van suikerriet of andere energiegewassen en weer anderen houden hun twijfels bij CO_2-opslag. Socolow en Pacala houden in *Science* hun lezer neutraal een set van vijftien kaarten voor de neus met de opdracht er zeven uit te kiezen, welke mag je zelf weten, maar met minder dan zeven kaarten is de kans groot dat de klimaatverandering uit de hand loopt.

1 Zuiniger voertuigen *Halveer het brandstofverbruik van 2 miljard auto's van 8 naar 4 liter per 100km.*
2 Minder autogebruik *Halveer het aantal kilometers per jaar voor 2 miljard auto's van 16.000 naar 8.000 km.*
3 Zuiniger gebouwen *Verminder Co_2-uitstoot voor koeling, verwarming en verlichting met een kwart in alle gebouwen tot 2055*
4 Hoger rendement kolencentrales *Produceer het dubbele van het huidige vermogen in kolencentrales. Rendement naar 60% in plaats van 30%.*
5 Schakel over op gascentrales *Vervang 1400 kolencentrales met 1 gigawatt vermogen door gascentrales.*
6 Co_2-opslag bij centrales *Vervang 800 kolen- of 1600 gascentrales met 1 gigawatt vermogen van Co_2-afvang en opslag.*
7 Co_2-opslag bij H_2 productie *Voorzie waterstoffabrieken van Co_2-opslag. Voor 250 megaton per jaar uit steenkool of 500 megaton per jaar uit gas.*
8 Co_2-opslag bij steenkool benzinefabrieken *Voorzie synthetische benzinefabrieken op basis van steenkool van Co_2-opslag. Capaciteit 300 miljoen vaten per dag als de helft van de Co_2 afgevangen wordt.*
9 Vervang steenkool door nucleair *Voeg 700 gigawatt aan kerncentrales toe. Dat is tweemaal de huidige capaciteit.*
10 Vervang steenkool door wind *Voeg 2 miljoen windturbines toe van 1 megawatt. Dat is 50 maal de huidige hoeveelheid.*
11 Vervang steenkool door zonne-energie *Voeg 2.000 gigawatt (piekvermogen) toe aan zonnepanelen op 2 miljoen hectare. Dat is 700 maal de huidige hoeveelheid.*
12 Laat auto's rijden op waterstof uit windenergie *Voeg daarvoor 4 miljoen windmolens toe van 1 megawatt. Dat is 100 maal de huidige hoeveelheid.*
13 Vervang fossiele brandstof door biobrandstof *Vergroot de ethanolproductie uit de VS en Brazilië met een factor 100. Dat kost 250 miljoen hectare of 1/6 van 's werelds akkers.*
14 Verminder boskap, stimuleer aanplant *Verlaag boskap van 0,5 gigaton koolstof nu naar 0 en richt 300 miljoen hectare bosbouw in. Dat is tweemaal zo snel als nu.*
15 Stop omploegen van akkerland *Zaaien op alle akkers zonder de grond om te ploegen. Tienmaal meer dan nu.*

TAB.03 Stabilisatiewiggen van Pacala en Socolow.

Een zonnig vooruitzicht

De vraag naar een verduurzaming van de energievoorziening gaat verder dan op gevoelsmatige basis te beslissen welke maatregelen de voorkeur hebben. De uitdaging die ons in de komende eeuw te wachten staat, want daar hebben we het over, is niet minder dan een nieuwe industriële revolutie. De opdracht is om te schakelen van fossiele naar duurzame energiebronnen. De wereld zal de overgang moeten maken van het fossiele tijdperk naar wat wel beschreven wordt als het zonnetijdperk. Het potentieel aan zonne-energie, direct of indirect in de vorm van windenergie, biomassa, golfenergie en waterkrachtcentrales, verhoogd met aardwarmte is volgens het *World Energy Assessment* 17 keer groter dan de hoeveelheid energie die de mensheid momenteel gebruikt.[157] Kortom, het potentieel is er en de technologie eveneens. Waar het op aankomt is een visie.

Het meest visionaire scenario dat ik tegen ben gekomen is het rapport *'Energiewende zur Nachhaltigkeit'* (Duurzame energierevolutie) van de wetenschappelijke adviesraad van de Duitse regering inzake wereldwijde milieuveranderingen WGBU.[158] In het begin verwoordt de WGBU de reikwijdte van de opdracht: 'De WGBU laat zien dat een wereldwijde energierevolutie noodzakelijk is, om de menselijke leefomgeving te beschermen en om de energiearmoede in ontwikkelingslanden te bestrijden. Alleen fundamentele veranderingen kunnen het huidige niet-duurzame energiesysteem in meer duurzame banen leiden. Een dergelijke energierevolutie zou niet in de laatste plaats vredebevorderend werken doordat de afhankelijkheid van regionaal geconcentreerde oliereserves afneemt.'

Al in de eerste zin betrekt het WGBU de ontwikkelingslanden in de nieuwe energievoorziening, een gedachte die eerder verwoord werd door Kees Daey-Ouwens (import van jatrophaolie) en Eduardo Zarza (zonnethermische centrales in Algerije). Europa zal nooit in de eigen energiebehoefte kunnen voorzien, dus een import van zonnestroom of biomassa uit zonniger gebieden is een goed begrepen eigenbelang. Maar zo'n relatie kan alleen duurzaam zijn als de andere partij er ook

baat bij heeft. Vandaar dat het WGBU met het voorstel komt om toegang tot energie tot mensenrecht te verheffen.

Uitgangspunten *Energiewende*

- Klimaatbescherming: een temperatuurstijging van 0,2 graden Celsius per 10 jaar of een wereldwijde gemiddelde temperatuurstijging met 2 graden zijn ontoelaatbaar.
- Duurzaam grondgebruik: 10 tot 20 procent van het aardoppervlak moeten onder natuurbescherming vallen. Niet meer dan 3 procent mag voor biobrandstoffen gebruikt worden, en nooit ten koste van natuurlijke ecosystemen. Bij conflict met andere gebruiken heeft voedselproductie voorrang.
- Bescherming van rivieren: net als bij landoppervlak, moet ook 10 tot 20 procent van de rivieren onaangetast blijven. Waterkrachtcentrales moeten dus beperkt blijven.
- Bescherming van zeeën: het WGBU vindt opslag van CO_2 in de bodem van oceanen ontoelaatbaar omdat de ecologische risico's te groot zijn.
- Bescherming van de atmosfeer: de luchtvervuiling moet wereldwijd teruggebracht worden. Eerst op EU-standaards, daarna tot nader te bepalen universele waarden.
- Universele toegang tot moderne energie: iedereen moet toegang krijgen tot elektriciteit. De gezondheid schadende verbranding van hout en biomassa moet vervangen worden door modernere brandstoffen.
- Energie als mensenrecht: Op z'n laatst in 2020 zou iedere wereldburger toegang moeten hebben tot 500 kilowattuur per jaar. Aan het einde van de eeuw moet dat het dubbele zijn.
- Energiekosten beperken: energiekosten voor arme huishoudens mogen hooguit 10 procent van het inkomen bedragen.
- Energiehulp: Om aan de individuele energiebehoefte te voldoen zou alle landen een bruto nationaal inkomen van 3.000 dollar per persoon ter beschikking moeten staan.
- Risico's beperken: een duurzame energieverzorging berust op technologieën die geen grotere risico's met zich meebrengen dan de omgeving. Kernenergie voldoet daar volgens het WGBU niet aan vanwege de ongewoon grote gevolgen van een ongeval en het onopgeloste afvalprobleem.

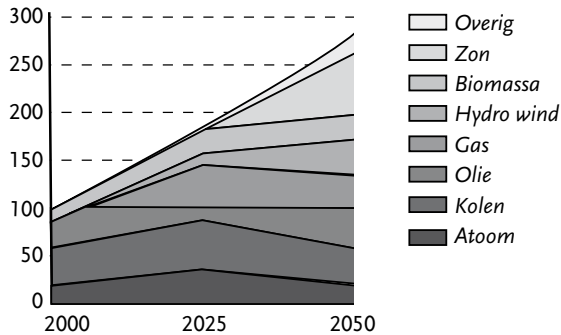

FIG.89 Wereldenergiemix volgens WGBU.

Het bijbehorende energiescenario van het WGBU heeft een ongewoon zonnig karakter. Het gebruik van fossiele brandstoffen groeit nog tot 2030 en vlakt dan af, waarna vanaf 2040 de daling inzet. In verhouding is het aandeel van gas het grootst, omdat het WGBU geen voorstander is van CO_2-opslag en dus geen 'groene steenkool' in wil zetten. Kernenergie vervult in het scenario een kleine en afnemende rol. Er worden in dit scenario geen nieuwe kerncentrales gebouwd en de bestaande gaan tot 2040 als een nachtkaarsje uit. Vanaf 2030 komt een nieuwe speler in het veld: zonne-energie. De verwachting is dat de prijsdaling van zonnepanelen doorzet zoals in FIG.51 te zien is. De prijs van zonne-energie komt dan omstreeks 2030 op het niveau van kolen- of gascentrales. Daarna, is de verwachting, wordt zonne-energie alsmaar goedkoper en fossiel duurder. Vooral na 2040 verwacht het WGBU een enorme bijdrage van zonne-energie. Aan het einde van de eeuw is in dit scenario de zon met 64 procent de grootste energiebron. In 2050 is de energierevolutie halverwege: de helft van de energie komt uit zon, aardwarmte, biomassa en wind. De andere helft bestaat dan nog uit gas, olie en steenkool.

Persoonlijk vind ik het WGBU scenario mooi en optimistisch. Wel twijfel ik aan de enorme verwachtingen van zonne-energie (bijna tweederde van de totale energievoorziening aan het einde van de eeuw). Ook vind ik de afwijzing van CO_2-opslag en van kernenergie te resoluut. Als het wat tegenzit met de groei van zonne-energie gaan we andere bronnen nog hard nodig hebben. Vandaar dat ik ervoor zou kiezen om kernenergie en steenkool met CO_2-opslag in te zetten als overgangstechnologieën.

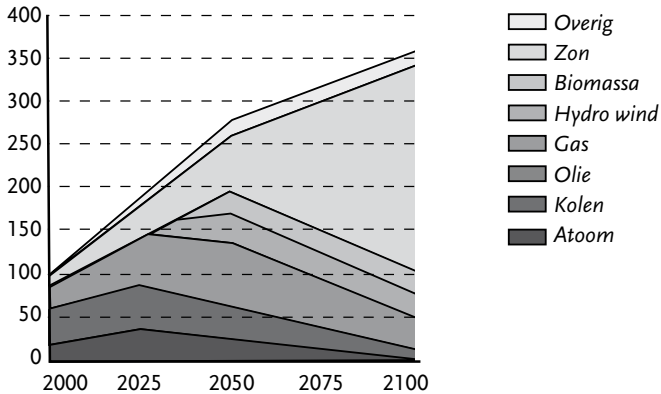

FIG.90 Wereldenergiescenario volgens WGBU tot 2100.

Uitgangspunt bij het WBGU-scenario is dat, om de temperatuurstijging tot twee graden te beperken, de wereldwijde CO_2-emissie in 2050 minstens 30 procent lager moet zijn dan in 1990. Voor industrielanden betekent dat volgens het WGBU een vermindering van 80 procent. In zich ontwikkelende economieën zou de groei in de uitstoot tot 30 procent beperkt moeten blijven. Dat zal niet meevallen, volgens de WGBU, omdat zonder maatregelen de stijging in ontwikkelende economieën eerder een verdubbeling of een verviervoudiging zal zijn. Reden te meer om ook die landen nadrukkelijk bij de *Energiewende* te betrekken. Als belangrijkste wegen wijst het WGBU op verhoging van het rendement bij opwekking en gebruik van energie en op het ontwikkelen van duurzame energiebronnen.

Het verbruik van fossiele brandstof moet teruggedrongen worden door de 'energieproductiviteit' te verhogen. Dat is het bruto nationaal inkomen per energie-eenheid. Dat klinkt abstract, maar het komt neer op een gedwongen verhoging van het rendement bij opwekking en gebruik van energie. Zo zouden vanaf 2050 centrales een minimaal rendement van 60 procent moeten hebben (nu is dat gemiddeld 50 procent voor gasgestookte centrales en 40 procent voor kolencentrales).[159] Die ontwikkeling wil het WGBU stimuleren door het instellen van internationale rendementsnormen waar centrales aan moeten voldoen. Die normen gaan dan langzaam omhoog richting 60 procent. Verder is het WGBU een voorstander van warmtekrachtkoppeling (waardoor de geproduceerde warmte niet langer verloren gaat) en van de inzet van warmtepompen en warmteopslag bij de verwarming en koeling van gebouwen.

Financiële maatregelen kunnen verhoging van energie-efficiëntie stimuleren. Het WGBU noemt de invoering van een koolstofbelasting en emissiehandel (waarbij bedrijven rechten kunnen verhandelen om een bepaalde hoeveelheid CO_2 te produceren). Subsidies op kolencentrales en kerncentrales moeten worden stopgezet volgens het WGBU-rapport.

Op korte termijn (tot 2020) zou het aandeel duurzame energie 20 procent moeten bedragen en in 2050 moet dat al 50 procent zijn. Het WGBU wil dat bereiken door internationaal verplichte quota voor duurzame energie vast te stellen.

Het probleem daarbij is dat men in Europa de doelstelling nobel vind, maar dat een aantal lidstaten moeite heeft met het verplichtende karakter van de de doelstelling. Desondanks is Europa op 9 maart 2007 over zijn eigen schaduw heen gesprongen. Op de Eurotop in Brussel werd toen besloten dat de Europese energiedoelstellingen (20 procent minder CO_2-uitstoot in 2020 ten opzichte van 1990, 20 procent duurzame energie in 2020 en 10 procent duurzame transportbrandstoffen) bindend zullen zijn. 'De Europese Unie heeft zich verbonden aan het meest ambitieuze milieuplan ter wereld,' schreef Trouw. 'Nu nog de uitwerking.'

Het WGBU stelt verder voor – in analogie van het emissiehandelssysteem – een beurs op te zetten waarin duurzame verplichtingen te verhandelen zijn. Het is daarbij natuurlijk niet de bedoeling dat een land al zijn duurzame verplichtingen af kan kopen, maar dat is allemaal te regelen.

Duurzame energie moet verder bevorderd worden door tal van financiële constructies zoals tijdelijke subsidies en vaste inkooptarieven, aldus het WGBU. Het succes van het Duitse *Erneuerbare-Energieen-Gesetz* laat zien dat er veel duurzame energie ontwikkeld wordt als daar financiële zekerheid over lange termijn tegenover staat.

Het elektriciteitsnet moet zo veranderd worden dat het ingericht is op veel kleine decentrale opwekkers. Aan de andere kant moeten er speciale verbindingen (HVDC)[160] komen met hoge capaciteit over lange afstand om bijvoorbeeld zonnestroom uit Noord-Afrika of stroom uit windparken op de Noordzee naar de diverse Europese landen te leiden.

Tot slot moet een begin gemaakt worden met het opbouwen van bedrijven en personeel in ontwikkelingslanden voor de uitwisseling van technologie tegen duurzame energiebronnen (gewassen of zon). Het best, vindt het WGBU, kan dat in de vorm van modelprojecten met een hoge signaalfunctie. Dergelijke projecten moeten aanschouwelijk ma-

ken hoe in ontwikkelingslanden een technologiesprong gemaakt kan worden. De hoop is dat van dergelijke projecten een hefboomwerking uitgaat, waardoor een zelfde ontwikkeling opeens op veel grotere schaal plaats gaat vinden. Als voorbeelden van zulke modelprojecten noemt het WGBU een strategisch partnerschap tussen de EU en Noord-Afrika om het potentieel aan zonne-energie op een manier te ontwikkelen die voor beide partijen profijtelijk is. Ander voorbeeld: de ontwikkeling van infrastructuur om traditionele biomassa om te zetten in biogas of bio-olie. Zowel voor eigen gebruik (gezonder dan houtvuurtjes) als voor export. Of het verbeteren van elektriciteitsnetten in Afrika met als klapstuk het 1-miljoenhuttenelektrificeringsprogramma: voorzie kleine afgelegen gemeenschappen van duurzame elektriciteit.

Stimulering van duurzame energie en verbetering van rendement op een niet eerder vertoonde schaal vereist een enorme technische ontwikkeling en daarnaast ook een politiek-sociale en economische omvorming. Daarvoor zouden de industrielanden volgens het WGBU hun energieonderzoeksbudgetten drastisch moeten verhogen: een vertienvoudiging maar liefst van de 1,3 miljard dollar per jaar die daar tussen 1990 en 1995 voor beschikbaar was. Inhoudelijk, het laat zich raden, zou het zwaartepunt van fossiele en atoomenergie verlegd moeten worden naar duurzame energievormen en rendementsverbetering. Uitkomst van onderzoek is altijd ongewis en in die zin blijft de omvorming van energievoorziening ook een zoektocht.

Maar de richting van de zoektocht staat vast en het uiteindelijke doel ook. Het rendement bij opwekking en gebruik van energie dient een stuk (twee tot drie keer) verbeterd te worden om de stijgende energievraag te beperken. Duurzame energie moet in de loop van de eeuw een steeds groter deel van de fossiele energie gaan vervangen. De overstap van fossiele naar duurzame energiebronnen zal de geopolitieke verhoudingen veranderen en hopelijk verduurzamen. Einddoel is het zonnetijdperk.

Het klimaat is als een tanker; een koerswijziging nu heeft pas over decennia merkbaar effect. Tot 2030 zal verduurzaming van de energievoorziening nauwelijks effect hebben op de klimaatverandering. Het broeikaseffect zet nog wel even door. Maar na 2030 wordt het minder erg dan wanneer we op dezelfde voet doorgaan. Dat is onze plicht tegenover de kinderen van nu. We kunnen straks niet zeggen dat we niet wisten wat we deden.

Kan ik er wat aan doen?

Haast is geboden. Het IPCC schrijft in mei 2007 dat de komende twintig tot dertig jaar bepalend zijn voor de gemiddelde temperatuurstijging op lange termijn, en daarmee voor de gevolgen van klimaatverandering. Eerst zal de uitstoot van broeikasgassen nog toenemen, maar het is belangrijk dat die trend zo snel mogelijk wordt omgebogen. Na de piek gaat de CO_2-uitstoot naar beneden. Hoe eerder die ombuiging plaatsvindt, hoe lager de CO_2-concentratie op lange termijn, het stabilisatieniveau.

Het IPCC publiceerde in mei 2007 onderstaande tabel met het verband tussen CO_2-stabilisatieniveau, het equivalente stabilisatieniveau dat ontstaat door bijtelling van de bijdragen van de andere broeikasgassen, de gemiddelde temperatuurstijging ten opzichte van pre-industrieel (we zitten nu op + 0,6), de periode waarin de mondiale CO_2-uitstoot zijn piek bereikt en begint te dalen en de relatieve CO_2-uitstoot in 2050 ten opzichte van 2000.

CO_2 stabilisatie PPM	*CO_2-eq stabilisatie PPM*	*Gem. temp. stijging tov 1900*	*Piek CO_2 in periode*	*Relatieve CO_2 emissie 2050*
350 - 400	445 - 490	2.0 - 2.4	2000 - 2015	-85 TO -50
400 - 440	490 - 535	2.4 - 2.8	2000 - 2020	-60 TO -30
440 - 485	535 - 590	2.8 - 3.2	2010 - 2030	-30 TO +5
485 - 570	590 - 710	3.2 - 4.0	2020 - 2060	+10 TO +60
570 - 660	710- 855	4.0- 4.9	2050 - 2080	+25 TO +85
660 - 790	855 - 1130	4.9 - 6.1	2060 - 2090	+90 TO +140

TAB.04 Stabilisatiescenario's. - Getallen uit IPCC IV, werkgroep 3

De tabel laat zich lezen als een spoorboekje voor het klimaatbeleid. De huidige CO_2 concentratie bedraagt al 380 ppm, de eerste rij van de tabel. Maar een daling van de CO_2-emissies is niet in zicht. Als het lukt om in de komende twintig jaar tot een daling van de mondiale CO_2-uitstoot te komen, komen we in de derde rij van de kolom terecht. Dat is wat Fred Pearce zijn 'trillion tonne challenge' noemt met een CO_2-stabilisatie van 470 ppm. Volgens het IPCC kunnen we dan een gemiddelde temperatuurstijging van 3 graden Celsius tegemoet zien. Meer dus dan de

2 graden die in het algemeen als veilige bovengrens gehanteerd wordt, maar waarschijnlijk het hoogst haalbare. Volgens datzelfde rapport kosten alle maatregelen die aan een dergelijke energierevolutie verbonden zijn zo'n 1,3 procent van het bruto wereldinkomen. Dat zal overigens voor verschillende landen anders uitpakken, met een maximum van 4 procent.

De invloed van een landje als Nederland, en zeker van een individuele burger, is op het geheel van de klimaatverandering natuurlijk nihil. Toch is afzwakking van het broeikaseffect alleen mogelijk door de gezamenlijke inspanning van miljarden mensen. Onder wie dus ook u en ik. Als afsluiting van het boek geef ik hier een lijstje van maatregelen die ik het meest kansrijk vind voor Nederland, als vlak en modderig landje met een grote ondiepe zee voor de deur.

In de eerste plaats denk ik dat op wereldniveau zo snel mogelijk een CO_2-belasting ingevoerd moet worden op fossiele brandstoffen. De opbrengsten daarvan zouden gereserveerd moeten worden voor onderzoek naar en maatregelen voor CO_2-reductie en voor aanpassingen aan de klimaatverandering.

Europa heeft in januari 2005 een begin gemaakt met het Europese emissiehandelsschema (EU ETS). In dat kader is aan energiehongerige industrieën in de 27 Europese lidstaten een beperkte hoeveelheid CO_2 toegewezen die ze uit mogen stoten. Die zogenaamde emissierechten kunnen ook verhandeld worden op een beurs. Hierdoor heeft CO_2 sindsdien een prijs. Het systeem gaat voor de periode 2008–2012 zijn tweede fase in, waarbij de emissierechten opnieuw en krapper worden vastgesteld. Men verwacht dat daardoor de prijs voor CO_2 zal stijgen tot 10–20 euro per ton CO_2. Het is de bedoeling het systeem uit te breiden met zoveel mogelijk landen, en ook de uitstoot van vliegverkeer en wegtransport in het schema onder te brengen. Aan de andere kant zou het systeem zo fijnmazig moeten worden dat uiteindelijk ieder bedrijf en elk huishouden betaalt voor de CO_2-emissie. Zo zou het emissiehandelsschema kunnen uitgroeien tot een basis voor een universele CO_2-belasting.

In Nederland zou zo snel mogelijk een wet voor duurzame energie ingesteld moeten worden. Bij voorbeeld naar het model van het succesvolle Duitse *Erneuerbare Energieen Gesetz (EEG)*. Maar wat voor vorm zo'n

wet ook krijgt, ik hoor van iedereen dat de belangrijkste eis is: lange termijn zekerheid voor investeerders. 'Lang' is in het geval van de EEG twintig jaar. Een regeling ter stimulering van duurzame energie heeft een vijf keer langere levensduur dan een kabinet. We moeten af van het zwalkende jojobeleid dat zo fnuikend is geweest voor de ontwikkeling van windenergie en dat nu door stopzetting van de MEP (Milieueffecten Elektriciteitsproductie, gestopt op 18 augustus 2006) opnieuw investeerders kopschuw heeft gemaakt. Het plotseling opheffen van een regeling voor duurzame energie, zoals met de Nederlandse MEP gebeurd is, zou onmogelijk gemaakt moeten worden. Afspraak blijft afspraak.

Toen de MEP-regeling nog van kracht was, kwamen er veel interessante initiatieven van de grond. Het aantrekkelijke tarief voor groene stroom maakte het lonend om energie uit mest te winnen met vergistinginstallaties, en om groen afval te verstoken in elektriciteitscentrales. Zulke initiatieven moeten zo snel mogelijk nieuwe kansen krijgen. Het is teleurstellend dat het kabinet Balkenende IV wel grote ambities heeft (30 procent minder CO_2-uitstoot in 2020 in vergelijking met 1990), maar een jaar uitstel heeft aangekondigd in de vervanging van de MEP.

Het grote en ondiepe continentale plat voor de Nederlandse kust biedt een uitgelezen kans voor de offshore windenergie. Ik vind dat we die kans ten volle moeten benutten. Dat brengt naast groene stroom ook werkgelegenheid voor de havens die nu veel te lijden hebben onder de teruggang van de visserij. Bovendien konden de windparken wel eens de nieuwe kraamkamers van de Noordzee worden, omdat er in de windparken niet gevist mag worden. Een spaarbekken volgens de plannen van Lievense zou de wisselvalligheid van de wind kunnen opvangen.

Om aardgas te sparen en CO_2-uitstoot te beperken ben ik voorstander van één of twee nieuwe kerncentrales van het type EPR dat ook in Finland gebouwd wordt. Eén ter vervanging van Borssele en ongeveer op dezelfde plek, de andere in Noordoost-Groningen, bij de Eemshaven. Kweekreactoren geloof ik niet in.

De Nederlandse drassige bodem lijkt grootse mogelijkheden te bieden voor opslag van warmte en koude. De eerste proefprojecten waaronder de Gesloten Kas zijn succesvol verlopen: de energie voor verwarming en koeling is meer dan gehalveerd. Het lijkt me hoog tijd om warmte- en

koudeopslag in nieuwbouw als standaardmethode te promoten. Proefprojecten als zonneterpen, waarbij de kas als warmtebron voor een paar honderd huizen fungeert, zouden zo snel mogelijk gebouwd moeten worden.

Vrijstelling of verlaging van brandstofaccijns voor CO_2-vrije of CO_2-arme brandstof zou een grote stimulans betekenen voor de ontwikkeling van ethanol en/of biodiesel en voor de investering in groene energie. In de praktijk zou een dergelijke maatregel investeringen in een biomassaraffinaderij in de Botlek en in een fabriek voor Groen Gas aan de Eemshaven interessant kunnen maken.

Een gerichte subsidie- of financieringsregeling zou het aantal zonnepanelen (voor stroom) en zonnecollectoren (voor warm water) op bestaande woonhuizen fors kunnen verhogen. In Duitsland heeft het EEG dat effect op zonnepanelen gehad.

Ook zou ik voorstander zijn van een financieringsprogramma voor woningisolatie. Uit gegevens van ECN blijkt dat ongeveer driekwart van het huishoudelijk energiebudget gebruikt wordt voor verwarming. Daar is veel winst te behalen. De kosten voor isolatiemaatregelen worden in de loop van jaren terugverdiend door een lagere gasrekening. Het probleem ligt vaak in het voorschieten van de financiering. Daar zou een regeling voor getroffen moeten worden.

Een voorbeeld daarvan is de regeling die men eind maart 2007 in Cambridge, Massachusetts, heeft getroffen. De thuisstad van Harvard University en Massachusetts Institute of Technology maakte bekend een energiefonds in te stellen ter waarde van 70 miljoen dollar. Honderden energieconsultants gaan in de komende vijf tot zeven jaar van deur tot deur om individueel energieadvies te geven. De kosten die gemoeid zijn met isolatiemaatregelen of installatie van een efficiëntere verwarming of koeling kunnen renteloos geleend worden uit het ingestelde fonds. Om een inschatting te kunnen maken: Cambridge telt iets meer dan 100.000 inwoners en een kleine 50.000 gebouwen. Universiteitsgebouwen, bedrijfspanden en woonhuizen of appartementencomplexen vallen allemaal onder de regeling.

Qua vervoer is het meest Nederlandse vervoermiddel, de fiets, wat mij betreft een vergeten alternatief. Goedkoop, snel, zuinig en CO_2-vrij. Bovendien heeft het vlakke Nederland een ongeëvenaarde infrastructuur

aan fietspaden. Frequenter gebruik van de fiets kan een groot aantal korte autoritjes uitsparen en de daarmee gepaard gaande CO_2-uitstoot.

Het Nederlandse spoornet zou uitgebreid moeten worden naar een dubbel net van intercity's en stoptreinen, waardoor die niet meer over dezelfde rails hoeven te rijden. Dat maakt, samen met investering in het rijdend materieel, een frequentere en meer betrouwbare dienstregeling mogelijk. Wat mij betreft heeft een grondige uitbreiding van het spoor prioriteit boven wegenbouw, omdat het energiegebruik per reiziger over het spoor enkele procenten bedraagt van dat van de automobilist.[161] Ook voor reizen binnen Europa verdient de trein de voorkeur boven het vliegtuig.

In huis tenslotte heb ik een paar jaar geleden vijftien tot twintig gloeilampen vervangen door spaarlampen. Dat levert niet spectaculair veel op, maar de gloeilampen hebben zo'n schandalig laag rendement (5 procent) dat ik niet vond dat ik daarmee door kon gaan. Inmiddels komen LED-lampen op de markt die een nog hoger rendement hebben dan spaarlampen. Bovendien gaan ze ongeveer even lang mee als een huis.

Wasmachines gebruiken de meeste stroom voor het opwarmen van water, terwijl geisers en boilers dat doorgaans veel efficiënter doen. Een aansluiting op de wasmachine voor warm water uit de (zonne-)boiler of geiser zou het energieverbruik aanzienlijk verlagen. Zulke 'hot-fill'-wasmachines zijn nog niet op de markt, maar zouden er wel moeten komen.

Een andere huiselijke ergernis is de elektrische kookplaat. Ik weet dat ergens in een centrale gas verbrand wordt om elektriciteit op te wekken, waarbij ongeveer de helft van de energie in de vorm van warmte geloosd wordt. Koken op gas is dus ongeveer twee keer efficiënter en bovendien sneller en heter. Mijn volgende kookplaat is er een op gas.

Tot slot

‘Mensen zijn vaak op hun best, en bereiken het meest, in tijden van crisis en snelle veranderingen, en ik hoop tegen beter weten in dat in de komende decennia, dat weer zal gebeuren.’

Thomas Homer-Dixon, auteur van The Upside of Down. Catastrophe, creativity and the renewal of civilisation en hoogleraar politicologie aan de universiteit van Toronto, Canada, in een interview met New Scientist, 25 nov 2006.

Met dank aan

Een boek als dit kan alleen tot stand komen dankzij de bereidwilligheid van specialisten om hun kennis te delen. Mijn dank gaat daarom in eerste instantie uit naar Ronald Mallant (ECN), Erik Lysen (CATO-programma), Paul Feron (TNO), Henk Bulder (Nuon), Hamid Mozzafarian (ECN), Henk Eisse, Brendo Meulman, Woilter Prins (BTG), Johan Roos en Sander Ansems (owneyesexperience), Eric van de Heuvel (Ecofys), Kees Daey Ouwens (TU Eindhoven), Jack Pronk (TU Delft), Huub den Rooijen en André Romeijn (Shell), Wim Sinke (UU en ECN), Tim van der Hagen (TU Delft), Hans Codée (COVRA), Nico Lommers en Fred Gardner (Teamwork Technologies), Peter Scheijgrond (Ecofys), Jan Post (Wetsus), Arjan Heinen (e-Traction), Henri Giesen (Essent), Stef Huisman (Huisman Hydro), Theo Ammerlaan (Themato), Hans Opdam (Ecofys), Niels Sijpheer (ECN), Jan van den Bremer (WNF), Evert Sjoerdsma (zonnehuis), Maarten Hommelberg en Frans Nieuwenhout (ECN).

Daarnaast dank ik Harm Oving (Teleac, HoeZo-radio) dat hij me in de gelegenheid heeft gesteld de radioreportages te maken en die beschikbaar heeft gesteld voor verspreiding via de CD.
Dank ook aan Koos Termorshuizen, Joost Reijnders en Maarten Keulemans voor hun commentaar op de eerste versie. Geloof me, hun inbreng heeft het boek een stuk verbeterd. En aan redacteur Jan Dirk Snel voor het op orde brengen van literatuurlijst en voetnoten.
Tenslotte dank aan Erno Eskens van Veen Magazines die zijn vertrouwen heeft getoond door dit boek uit te geven.

Voetnoten

1. *Twee graden ten opzichte van 1900 of 'pre-industrieel'. In 2000 was de gemiddelde temperatuur ten opzichte van 1900 met 0,6 graden gestegen.*
2. *Cijfers van Prof. Pier Vellinga, faculteit aard- en levenswetenschappen, VU.*
3. *Wereldenergiegebruik 2004: 11.204 Mtoe, 2030: 17.095 Mtoe volgens IEA referentiescenario. Totale uitstoot CO_2 2004: 26.079 Mton; 2030: 40.420 Mton*
4. *Surrey Iron Railway in Londen, 1802.*
5. *Heinberg, The Party's Over, 55.*
6. *Olie oppompen is strikt genomen de exploitatie, de productie is een geologisch proces van honderden miljoenen jaren.*
7. *Nu, ruim honderd jaar later worden er geavanceerde dieselmotoren terug aangepast voor het verbranden van plantaardige olie.*
8. *Hans Hilbers, Jan Ritsema van Eck en Daniëlle Snellen, Behalve de dagelijkse files. Over betrouwbaarheid van reistijd (Rotterdam/Den Haag 2004).*
9. *Maarten Keulemans, 'Luilekkerland voor verkeer is onhaalbaar', Delft-Integraal 2007-1.*
10. *Heinberg, The Party's Over, 71.*
11. $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2\ NH_3$ *+ warmte.*
12. $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ *en* $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H2$.
13. *V. Smil, 'Detonator of the population explosion', Nature, Vol.400, 29 jul 1999, 415.*
14. *M.D. Fryzuk,'Inorganic chemistry Ammonia transformed', Nature, Vol. 427, 5 feb 2004, 498.*
15. *Het transcript staat op http://www.whatreallyhappened.com/ARTICLE5/april.html.*
16. *Stephen Pelletière, Iraq and the International Oil System. Why America went to War in the Gulf (Westport CT 2001).*
17. *Integraal te vinden op http://www.whitehouse.gov/news/releases/2003/02/20030205-1.html.*
18. *U.S. Geological Survey World Petroleum Assessment 2000.*
19. *H.W. Parker, 'Demand, Supply will determine when oil output peaks', Oil & Gas Journal, 25 feb 2002.*
20. *Bahman Tohidi, 'Making fire from ice: a new fuel for the 21st century', The Independent, 18 okt 2006 (www.independent.co.uk).*
21. *Het Financieele Dagblad, 27 apr 2006.*
22. *Cijfers: F. William Engdahl, Century of War. Anglo-American Oil Politics and the New World Order (Londen 2004[2]).*
23. *De Volkskrant, 1 mei 2004. Dat was in 2004. In april 2007 staat de prijs op $65, en de voorspelling voor 2008 op $85.*
24. *'Bush, Brazil's leader unveil ethanol deal', Sun-Sentinel, Florida, 10 maart 2007.*
25. *Zie 'Verbruik van Brandstoffen 'in Nederland' op site www.energie.nl gebaseerd op cijfers CBS, 2005.*
26. *Om precies te zijn:* $2\ H_2O$ *à* $2\ H_2 + O_2$.
27. *Voor uitleg zie kader 7: 'Hoe werkt een brandstofcel' in hoofdstuk 'Waterstof op wielen', p.**
28. *Intergovermental Panel on Climate Change, het door de VN ingestelde klimaatpanel, cijfers uit IPCC rapportage IV, werkgroep 3, publicatie 4 mei 2007.*
29. *Citaten uit lezing Broecker op Cornell University, Cornell Chronicle, 6 aug 1998.*

30. *Aldus Fred Pearce, 'Climate Change. What the IPCC didn't tell us', New Scientist, 9 feb 2007.*
31. *Pearce, The Last Generation, 298 e.v.*
32. *400 miljard ton C komt overeen met 1400 miljard ton CO_2. Beide eenheden worden nog wel eens door elkaar gehaald.*
33. *Bron: Energie in Cijfers, ECN op www.energie.nl*
34. *Kerry Emanuel, 'Increasing destructiveness of tropical storms over the past 30 years', Nature 436, 4 aug. 2005.*
35. *New Scientist, Editorial, 4 nov 2006.*
36. *'Africans are alreeds facing climate change', Christian Science Monitor, 6 nov 2006.*
37. *Stern, The Economics of Climate Change, vaak aangeduid als het Stern Review, Cabinet Office - HM Treasury UK, oktober 2006 (ISBN: 9780521700801).*
38. *Voor de dagwaarde zie de grootste koolstofbeurs: www.eex.de.*
39. *Stern Review, xxvii.*
40. *Documentaire van regisseur Davis Guggenheim, ging op Sundance Festival 2006 in première en behaalde een Oscar-nominatie.*
41. *Rapport '2006 disasters in numbers' op site* www.unisdr.org.
42. Uit het Gleneagles G8 communique, p.3, www.iea.org/G8/g8summits.htm.
43. Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006.*
44. De IEA rekent met de waarde van de dollar in 2005. De bedragen zijn dus exclusief een verwachte inflatie van 2,3 %. Als de die meeneemt, kom je niet op $ 55, maar op $ 97 in 2030.
45. Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, 61.
46. Van 11.204 naar 17.095 Mtoe in de periode 2004 tot 2030. Mtoe is een energiemaat en staat voor miljoen ton olie equivalent.
47. OESO: Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling - dertig landen behorend tot grofweg VS, Canada, Europa, Japan en Australië.
48. Bij verbranding van steenkool komt 75 procent meer CO2 vrij dan bij eenzelfde hoeveelheid energie uit aardgas. Zie *carbon footprint calculator* op www.bp.com.
49. Kyoto doelstelling: In 2012 gemiddeld 5,2% minder CO2-emissie dan in 1990.
50. Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, 79.
51. Totaal energiegebruik 2030 volgens alternatief scenario: 15.405 Mtoe.
52. Dat kan heel anders uitpakken als afvang en opslag van CO2 een praktische optie wordt. Dan zou steenkool een CO2-vrije energiebron kunnen worden. Meer over die technologie in het hoofdstuk 'Stripper in het lab'.
53. In plaats van 1,3 procent per jaar in het referentiescenario.
54. Europa 0,3 miljard ton CO_2 minder per jaar en Japan 0,2 miljard ton (Alt. Scen. IEA).
55. Pearce, *Last Generation*, 299: 800 miljard ton C in de lucht. Dat komt overeen met 3,5 * 800 = 2.800 miljard ton CO2.
56. Pearce, *Last Generation*, 299: 800 ton C komt overeen met 380 ppm CO2 (de huidige concentratie).
57. Publicatie IPCC IV, werkgroep 3: 4 mei 2007
58. *Stern Review*, Executive Summary, v.
59. IPCC rapport 2007, werkgroep 1, Summary for Policy Makers, 10.
60. Instralend vermogen van de zon: 174.000 terawatt. Totaal wereld energieverbruik in 2004: 130.000 terawattuur, komt overeen met 130.000

/ (365x24) = 15 terawatt, dat is 11.600 keer minder.

61. Kernenergie laat ik hier weg, omdat die misschien wel CO2-vrij is, maar niet duurzaam.
62. Cijfers uit Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, 492 e.v. Cijfers Nederland: EC DG-TREN, *Energy & Transport in Figures 2006*.
63. Cijfers Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, 492 e.v. Wereldstroomgebruik 2004 bedraagt 17.408 TWh, 13 procent van totaal aan energieverbruik. Cijfers Nederland: EC DG-TREN, *Energy & Transport in Figures 2006*.
64. Cijfers uit 'Energy and the Challenge of Sustainability', *World Energy Assessment* (New York 2000) 168.
65. Idem, totale energie 2003 bedraagt 130.000 TWh, daarvan is stroom met 16.700 Twh ongeveer 13 procent.
66. Cijfers uit *Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power*, summary, 5.
67. VPRO Noorderlicht 20 mei 1996, De verbranding voorbij.
68. Nurettin Demidöven and John Deutch, 'Hybrid Cars Now, Fuel Cell Cars Later', *Science*, 13 aug 2004.
69. 2001 Review van het CO2 capture project.
70. Idem.
71. Kay Damen van TNO komt in op de volgende inventarisatie: gasveld Groningen: 7350 megaton (MT); andere gasvelden onshore: 1600 MT; gasvelden offshore: 1150 MT; aquifers onshore: 400 MT en aquifers offshore: 350 MT. Samen 10.850 MT. Daarnaast een bescheiden potentieel in olie- en kolenvelden (80 - 640 MT).
72. De techniek staat bekend als *Integrated Gassification Combined Cycle* of IGCC.
73. Cijfers uit Ad van Wijk en David de Jager, *Poseidon. Sustainable energy supply sets out to sea*, 27.
74. De prijs van de emissierechten in euro per ton CO_2 zijn flink in beweging. Kijk voor de dagwaarde op de Europese energie index: www.eex.de.
75. 'Netherlands invested a lot of research, but still operates demonstration-scale biomass-only plants', *Nature*, 7 dec 2006, 678.
76. OLGA is een gaswasser op basis van olie (*OiL based GAswasher)* die door ECN ontwikkeld is.
77. Naast energiebesparing in gebouwen, micro-wkk, aardgas met CO2-opslag en energiebesparing glastuinbouw.
78. http://www.senternovem.nl/energietransitie.
79. Forest Stewardship Council, uitspraak VPRO radio, 29 juni 2004.
80. Milieu-effecten Energie Productie: een regeling die het gebruik van groene stroom bevorderde door 9,7 cent per kilowattuur uit te keren.
81. Uitgebreide beschrijving Fischer-Tropsch-proces in volgende hoofdstuk: Plantaardig Tanken.
82. www.owneyesexperience.nl.
83. Aldus Lucas Reijnders in zijn boek *Energie*, 19.
84. Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, 425.
85. Getallen van ECN: www.energie.nl, totale Nederlandse energieverbruik 2005: 3314 PJ.
86. Getallen uit 'Fuels Gold', *New Scientist*, 23 sept 2006.
87. *Nature*, 7 dec 2006, 670.
88. *Nature*, 7 dec 2006, 670.
89. David Tilman, Jason Hill & Clarence Lehmann, 'Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High Diversity Grassland Biomass', *Science*, Vol. 314, 8 dec 2006, 1598.
90. *Nature*, 7 dec 2006, p. 678.

91. 'Olifantpoepschimmel helpt bakkergist', *Bionieuws,* 11 nov 2005.
92. Mark Z. Jacobson , 'Effects of Ethanol (E85) versus Gasoline Vehicles on Cancer and Mortality in the United States', *Evironmental Science & Technology,* 18 april 2007.
93. Getallen uit *Nature* (7 dec 2007, Biofuel Special), *Trouw* (suikerbieten, 22 nov 2006) en *Senter-Novem* (koolzaad en jathropa)
94. Heidi Ledford, 'Making it up as you go along', *Nature,* 7 dec 2006.
95. *De Ingenieur,* 17 nov 2006, 20.
96. Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006,* 396.
97. Kees Daey Ouwens, *Wegen naar een Duurzame energievoorziening,* 19.
98. *Trouw,* 27 jan 2007, 16: 'Rotterdam moet zich op biomassa richten'.
99. Maarten Keulemans, 'Ploeteren rond de molens', *Delta,* 27 okt 2005.
100. Joost Panhuysen, 'Rotterdam steekt miljoen in laddermolen', *Delta,* 22 mrt 2007
101. www.sonnenseite.com.
102. EurOberserver 2004 in *A Vision for Photovoltaic Technology.*
103. Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, 541.
104. European Commission, *A Vision for Photovoltaic Technology*, 27.
105. 'Platz an der Sonne', *Die Zeit*, 23 nov 2006.
106. Central ElectroSolar de Almería (CESA).
107. De Ingenieur, Dossier Zonne-energie, 14 jul 2006.
108. De Ingenieur, Dossier Zonne-energie, 14 jul 2006, tabel rendementen.
109. Concept staat bekend als HVDC (high voltage direct current).
110. 60 TWh / 350 (dagen zon) * 12 (uren zon per dag) = 0,014 TW = 14 GW.
111. Uit toespraak El Hassan Bin Talal tijdens World Energy Dialogue, Hannover, april 2006.
112. In het televisieprogramma Buitenhof, 12 feb 2006.
113. De Gaia-hypothese (gepubliceerd in 1979) beschrijft de aarde als een zelfregulerend organisme. De theorie werd aanvankelijk alleen omarmd door holisten, maar kreeg eind jaren negentig ook wetenschappelijke navolging.
114. Ingezonden stuk in *The Independent*, 24 mei 2004.
115. Het maximale rendement bij de omzetting van warmte naar beweging is volgens de wet van natuurkundige Carnot: (Thoog-Tlaag)/Thoog. Een hoge begintemperatuur is dus gunstig voor het rendement.
116. PvdA-energiedeskundige Diederik Samsom is afgestudeerd bij Tim van der Hagen en de twee hebben regelmatig contact. Voor en achter de openbare podia.
117. De Ingenieur, Dossier Kernenergie, 3 nov 2006.
118. John Deutch en Ernest Moniz, *The Future of Nuclear Energy*, Cambridge MA, 2003, Summary, 14.
119. Alfastraling zijn uitgestoten heliumkernen. Tegen te houden met een papiertje, maar in het lichaam richten de alfadeeltjes grote biologische schade aan.
120. 'Plutonium: An element at odds with itself,' *Los Alamos Science* 26 (2000).
121. Zie verder www.BlackLightPower.com voor meer pseudowetenschap. Het dikke boek is hier gratis te downloaden.
122. Ian Farnan, Herman Cho and William J. Weber, 'Quantification of achttiende alpha-radiation damage in minerals and ceramics', *Nature,* 11 jan 2007.
123. 'Gekraakte kristallen', Noorderlicht, 11 jan 2007, noorderlicht.vpro.nl.

124. BBC-website: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/cumbria/4559771.stm.
125. Robert Alvarez, *Reducing the Risks of Highly Enriched Uranium at the US Department of Energy's Y-12 National Security Complex*. Washington DC 2006.
126. 'Disaster waiting to happen', *New Scientist,* 28 okt 2006, 8.
127. BBC news-site, 05 feb 2006: 'Nuclear industry looks at Finland'
128. In het programma Ockham's Razor van Australische Radio National van 9 okt 2005.
129. 'Deltaplan Kernenergie', *Natuurwetenschap & Techniek*, 3 (2006), 27.
130. 'Deltaplan Kernenergie', *Natuurwetenschap & Techniek*, 3 (2006), 27.
131. Het Financieele Dagblad, 08 jul 2006, 8.
132. Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, 529. Alt. scenario 185 TWh geothermisch van 29.835 TWh totaal in 2030.
133. Getallen van Iceland Energy Authority (Orkutölur) over 2004.
134. New Scientist, 14 aug 2004, 38–41.
135. De Ingenieur, 6 okt 2006, 25.
136. NRC Handelsblad, 21 dec 2006, 3.
137. Hisgen & Laane, *Geheimen van de zoute zee*, 28/29.
138. Bron: World Energy Council.
139. Zie ook verdere uitleg in kader 21 'Blue Energy' aan het einde van dit hoofstuk.
140. Uitleg achteraan dit hoofdstuk.
141. Totale elekriciteitsverbruik 2005: 102 miljoen megawattuur (www.energie.nl), gemiddeld vermogen dus 102 miljoen / (365x24) = 12.000 megawatt.
142. Groene stroom 2005: 7 miljoen megawattuur.
143. 'The Car, 2.0', *Boston Globe*, 18 feb 2007.
144. 'Netwerkbeheerders testen microwkk's', *Technisch Weekblad*, 20 okt 2006.
145. Technisch Weekblad, 20 okt 2006, 5.
146. In opdracht van Platform Nieuw Gas door COGEN Projects, Ecofys, TNO en ECN, juli 2006.
147. Zoninstraling sector: 350 PJ, nationaal brandstofgebruik 2005 volgens ECN: 3300 PJ. Gebruik van sector aan gas en elektriciteit: 155 PJ. 1 PJ = 1 petaJoule = duizend miljard miljard joule.
148. Rendement kolencentrale 40 procent, stoom- en gasgenerator (STEG) maximaal 60 procent, rendement wkk 75 tot 80 procent.
149. European Commission, *European Technology Platform SmartGrids. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*, 17.
150. Fred Wellington e.a, *Scaling Up: Global Technology Deployment to Stabilize Emissions*. New York 2007.
151. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), *Welt im Wande,* Zusammenfassung, paragraaf. 4.1.
152. Teske, *Energy Revolution*, Summary, 4.
153. CO_2 emissies Alt. Scenario Europa: 1990: 3934 Mton/jaar; 2030: 3818 Mton/jaar, Priddle (ed.), *World Energy Outlook*, 541.
154. IEA Referentiescenario EU voor 2030 tov 2004: primair +12%, stroom +36%.
155. Smart Energy Mix, 62.
156. Smart Energy Mix, 60.
157. Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, 171.
158. S. Pacala en R. Socolow, 'Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the next 50 Years with Current Technologies', *Science*, 13 aug 2004.

159. Pacala en Socolow rekenen met de massa van koolstof. De corresponderende CO_2 massa is 3,6 maal hoger vanwege mol. massa C=12 en mol. massa CO_2=12+2x16=44. 44/12=3,6.
160. 'Energy and the Challenge of Sustainability', *World Energy Assessment*, Hk. 5.
161. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, *Welt im Wandel. Energiewende zur Nachhaltigkeit.*
162. *Welt im Wandel*, Zusammenfassung, 4/5.
163. HVDC staat voor High Voltage Direct Current, of gelijkstroomhoogspanningsleidingen.
164. Tussen 2 en 3 procent volgens onderzoek van Australian Greenhouse Office, gepubliceerd door Public Transport Users Association (PTUA) op 16 dec 2006.

Begrippenlijst

AARDGAS
in principe elk gas dat uit de bodem komt. In de praktijk koolwaterstofverbindingen die vaak in de buurt van olievelden voorkomen. Het bestaat dan uit methaan, ethaan en kooldioxide.

ALFASTRALING
komt voort uit radioactief verval van atoomkernen en bestaat uit heliumkernen. Is makkelijk tegen te houden, maar richt in het lichaam grote biologische schade aan.

AQUIFER
waterhoudende grondlaag. Recent in de belangstelling als warmteopslag of diepere lagen als mogelijke opslag van kooldioxide.

ARBEID
mate van energieverandering bij een door een kracht veroorzaakte verplaatsing.

BIOGAS
door levende cellen of bacteriën geproduceerd gas, vaak methaan en kooldioxide.

BIOMASSA
verzamelterm voor plantaardig en dierlijk materiaal bestemd voor energieopwekking.

BRANDSTOFCEL
een doosachtige opstelling die uit de combinatie van waterstof en zuurstof (uit de lucht) stroom en water produceert. Er zijn ook typen die op aardgas werken.

BROEIKASEFFECT
het verschijnsel dat bepaalde gassen, met name kooldioxide en methaan, zonnestraling opnemen waardoor de atmosfeer opwarmt.

CARNOTCYCLUS
omzetting van een warmtestroom van hoge naar lage temperatuur in arbeid door een zogenaamde warmtemotor. Het rendement is hoger naarmate het temperatuurverschil groter is.

CARNOTFACTOR
maximaal rendement bij temperatuur T en omgevingstemperatuur T_{omg}: Carnotfactor = $(1 - T_{omg} / T)$

DEUTERIUM
waterstofisotoop met een kern bestaand uit een proton en een neutron. Ook wel zwaar waterstof genoemd.

DUURZAME ENERGIE
iedere energiesoort die door de natuur aangevuld wordt. Ook wel: hernieuwbare energie.

ELEKTRON
atomaire bouwsteen en drager van de elementaire negatieve lading.

ETHANOL
‘gewone’ of consumptiealcohol. Staat in de belangstelling als alternatieve transportbrandstof.

FISCHER-TROPSCH-PROCES
chemisch proces waarbij koolmonoxide en waterstofgas onder invloed van een katalysator aan elkaar geregen worden tot langere koolwaterstofketens. Van toepassing bij vervaardiging van benzine

uit kolengas of omzetting van aardgas in vloeibare brandstof.

FLOW BATTERY
accu die stroom levert bij de doorstoom van bepaalde chemicaliën. Opslagcapaciteit wordt bepaald door de grootte van de tanks en is dus in principe onbegrensd.

FOSSIELE BRANDSTOF
brandstof die gevormd is uit fossiele resten van planten en dieren die in de aardkorst onder hoge druk en temperatuur een transformatie hebben ondergaan. Verzamelterm voor steenkool, aardolie en aardgas.

GAMMASTRALING
hoogenergetische elektromagnetische straling die ontstaat bij het radioactief verval van atoomkernen. Heeft een hoog doordringend vermogen.

GENERATOR
toestel dat beweging omzet in elektriciteit.

GEOTHERMISCHE ENERGIE
energie die uit de warmte van de ondergrond gewonnen wordt.

GASHYDRAAT
verbinding van gas en watermoleculen, waarbij het gasmolecuul opgesloten zit in een moleculair kooitje van ijs.

GROEN FOSSIEL
term voor verbranding van fossiele brandstof waarbij de kooldioxide wordt opgevangen en ondergronds wordt opgeslagen.

GIGA
voorvoegsel voor factor miljard, 1000.000.000 of 10^9.

GROEN GAS
methaan uit biologische bron, wordt verkregen door ontleding van plantenresten bij hoge temperatuur. Ook wel: SNG of 'synthetic natural gas'.

HVDC
High Voltage Direct Current, alternatieve hoogspanningsleiding met gelijkstroom. Zou minder verlies opleveren dan de gebruikelijke wisselstroom hoogspanningsleidingen.

HELIOSTATS
draaibare grote spiegels die het zonlicht concentreren op een brandpunt in een zonnetoren.

HYBRIDE AUTO
auto die zowel van een verbrandingsmotor gebruik maakt als van een elektromotor. Het brandstofgebruik is hierdoor lager.

HOOFDWET VAN DE THERMODYNAMICA
Natuurkundige wet die stelt dat in een gesloten systeem geen energie kan ontstaan of verloren gaan. De energie verandert alleen van vorm. Voorbeeld: een remmende auto verliest bewegingsenergie, maar de remmen worden warm. De hoeveelheid warmte in de remmen is dan gelijk aan de bewegingsenergie die de auto had. Bewegingsenergie is dus niet verloren gegaan, maar omgezet is warmte.

ION
geladen atoom, vaak in oplossing, maar ook in een gas.

JOULE
internationale standaard energie-eenheid voor arbeid en warmte. 1 Joule is de arbeid die verricht wordt als een kracht van 1 Newton een ding 1 meter verplaatst.

KELVIN
maat voor absolute temperatuur. 0 graad Celsius = 273 Kelvin. Water kookt dus bij 373 Kelvin.

KERN
atoomkern. Opgebouwd uit positief geladen protonen en neutrale neutronen.

KERNENERGIE
energie afkomstig uit de splijting of fusie van atoomkernen.

KERNFUSIE
proces waarbij twee lichte kernen samensmelten waardoor energie vrijkomt.

KERNREACTOR
samenstelling van verrijkt uranium waarin een gecontroleerde kettingreactie plaatsvindt, waardoor kernenergie warmte en straling produceert.

KERNSPLIJTING
proces waarbij een zware kern (uranium U_{235}) splijt, waardoor energie en straling vrijkomen. Basis van kernenergie.

KILO
voorvoegsel voor factor 1000 (10^3).

KOLENGAS
gas dat ontstaat door verhitting van steenkool zonder zuurstof. Bij deze 'droge destillatie' komen voornamelijk waterstof en koolmonoxide vrij. Ook wel: stadgas of synthesegas.

KOOLDIOXIDE – (CO_2)
gas dat bij verbranding van koolstofhoudende brandstof vrijkomt. Vanwege de hoeveelheid in de atmosfeer de voornaamste veroorzaker van het broeikaseffect.

KWEEKREACTOR
kernreactor waarin uranium door snelle neutronen omgezet wordt in plutonium, waarmee nieuwe brandstofstaven vervaardigd kunnen worden.

LITHIUM
licht metaal waaruit in een kernfusiereactor tritium wordt gemaakt. Daarnaast zijn lithiumzouten erg populair als antidepressiva. Hoe dat werkt weet niemand.

MEGA
voorvoegsel voor factor miljoen (1.000.000 of 10^6).

METHAAN – (CH_4)
hoofdbestanddeel van aardgas en van biogas.

MICRO-WKK
thuisinstallatie die zowel warmte als stroom produceert. Ook wel: de nieuwe generatie cv-ketel of 'toverketel'.

MTOE
Miljoen ton olie equivalent, is gelijk aan 41 miljoen miljard Joule.

NATRIUM
licht metaal dat in vloeibare vorm (meer dan 97 graden Celsius) gebruikt wordt voor de koeling van de kweekreactor.

NEUTRON
atomaire bouwsteen zonder lading. Vormt samen met protonen de atoomkern.

NEWTON
internationale standaardeenheid voor kracht. Een massa van 1 kilogram ondervindt een zwaartekracht (heeft een gewicht) van 9,8 Newton.

NEWTONMETER – (Nm)
standaardeenheid voor arbeid, identiek aan 1 Joule.

PAARDENKRACHT – (pk)
verouderde eenheid voor vermogen. 1 pk = 735 Watt of 0,735 kW. 1kW = 1,36 pk.

PALLADIUM
zilverachtig metaal dat bekend staat om katalytische werking, waardoor chemische reacties beter verlopen.

PERMAFROST
verschijnsel dat de grond permanent bevroren blijft. In buurt van poolcirkel en in hooggebergten.

PETA
voorvoegsel voor factor duizend miljoen miljoen (1.000.000.000.000.000 of 10^{15}).

PLASMA
toestand waarin atoomkernen en elektronen niet langer gebonden zijn. Een plasma is geïoniseerd en geleidt stroom.

PLUTONIUM
zwaar metaal dat kunstmatig gemaakt wordt uit uranium door het met neutronen te bombarderen.

PPM
concentratiemaat voor atmosferische gassen. Letterlijk: parts-per-million.

PROTON
positief geladen atomaire bouwsteen. Vormt samen met neutronen de atoomkern.

PV
Engelse afkorting voor 'photovoltaic', naar het werkingsprincipe van zonnecellen. PV wordt daarom vaak als afkorting voor zonnecellen gehanteerd.

PYROLYSE
ontleding van plantaardig materiaal in afwezigheid van zuurstof bij hoge temperatuur (500 graden Celsius).

RADIOACTIVITEIT
het spontaan uiteenvallen van bepaalde zware elementen waarbij röntgenstraling, versnelde elektronen en positief geladen heliumkernen vrijkomen.

RENDEMENT
bij energieomzetting de verhouding tussen de hoeveelheid van de gewenste energievorm en de totale inkomende energie. Is in de regel kleiner dan 100 procent.

SILICIUM
Element dat in zeer zuivere vorm geschikt is als grondstof voor de chipindustrie en voor zonnecellen.

SUPERKRITISCH
toestand van water bij 600 graden en 300 atmosfeer die tussen vloeibaar en stoom in zit. Maakt water tot een extreem agressief oplosmiddel.

SYNTHESEGAS
mengsel van koolmonoxide (CO) en waterstof waaruit door synthese willekeurig lange koolwaterstofmoleculen gemaakt kunnen worden.

TERA
voorvoegsel voor factor miljoen miljoen (1.000.000.000.000 of 10^{12}).

THERMODYNAMICA
de leer van energiestromen en omzetting.

TRITIUM
waterstofisotoop met 1 proton en 2 neutronen. Speelt een rol bij kernfusieproces.

TURF
gedroogd veen, dat in Nederland tot de komst van steenkool in de negentiende

eeuw in gebruik was als brandstof. In Ierland gebruikt men het nog steeds.

TWEEDE HOOFDWET
(van de thermodynamica) beschrijft de omzetting van warmte in arbeid en houdt in dat warmte nooit volledig in arbeid kan worden omgezet. Het rendement wordt beter bij een hoge begintemperatuur en wordt begrensd door de Carnot-factor.

URANIUM
element dat in verrijkte vorm geschikt is voor brandstofstaven in een kernreactor.

VAT
traditionele inhoudsmaat voor olie (159 liter, engels: barrel).

VERGASSING
thermisch proces waarbij materiaal ontleedt in aanwezigheid van een beetje zuurstof.

VERMOGEN
verrichte arbeid of geleverde warmte per tijdseenheid (seconde). Eenheid: Watt. Dus 1 Watt = 1 Joule per seconde.

WARMTEPOMP
apparaat dat warmte transporteert van lage naar hoge temperatuur. Bekendste voorbeeld: de koelkast.

WARMTEWISSELAAR
toestel dat warmte overdraagt van het ene medium naar het andere. Bekendste voorbeeld: een radiator in de auto.

WATERSTOF – (H_2)
lichtste element. Staat in de belangstelling als CO_2-vrije brandstof, maar komt van nature niet ongebonden voor. Moet dus gemaakt worden met (liefst groene) energie.

WATT
internationale standaardeenheid voor vermogen, is energie per tijdseenheid (Joule / seconde).

ZONNECEL
plat element (circa 15 bij 15 cm) dat zonlicht omzet in stroom. Het rendement ligt tussen 15 (standaard) en 30 procent (laboratoriamodellen). Er bestaan verschillende typen qua materiaal en werking.

ZONNECOLLECTOR
paneel dat zonnewarmte overdraagt aan water. Ook wel: zonneboiler.

ZONNEPANEEL
groter geheel, samengesteld uit zonnecellen.

Index

"11" september 2001, *28, 30, 37, 40*

A

Aalborg, Universiteit van, *198*
aardgas (CH4), *5, 25, 26, 36, 38, 39, 40, 63, 74, 84, 88, 89, 90, 99, 100, 101, 102, 103, 125, 127, 159, 190, 236, 252, 254, 269, 276, 278,*
aardgasvelden, *87*
aardolie, *20, 21, 31, 125, 128, 253, 276*
aardwarmte, *44, 46, 73, 74, 75, 182, 184, 185, 186, 187, 189, 190, 253, 260, 262*
Abisko, *12*
aerofoil, *140*
Afghanistan, *29, 42*
Afsluitdijk, *193, 205*
agent, *240, 242, 243, 244*
Albertsson, Albert, *187, 188*
alfastraling, *169, 177, 274*
algen, *92,93,*
algenkweek, *93*
Algerije, *160, 260*
Almere, *190*
Almería, *156, 154, 156, 157, 159*
alternatieve scenario, *61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 251, 252*
Alting von Geusau, Alexander, *165*
Amerika (VS), *20, 22, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 41, 42, 43, 64, 94, 154, 179, 180, 194, 226*
amine, *88*
ammoniak (NH_3), *25, 100, 102*
Andasol, *159*
Ansems, Sander, *116, 118, 274*
Antropoceen, *47*
Apeldoorn, *86, 88, 208, 209, 212, 213, 214, 218*
Apollo, *83*
aquifers, *87, 223*
arbeid, *17, 18, 144, 216, 274, 276, 278, 279, 280*
Archimedes Wave Swing (AWS), *191, 196, 197*
Arrhenius, Svante, *9, 48, 49, 52*
asfalt, *22, 24*
auto, *14, 20, 21, 23, 24, 27, 45, 53, 65, 69, 77, 80, 81, 82, 84, 93, 100, 116, 120, 123, 129, 165, 202, 207, 208, 210, 211, 236, 238, 248, 277, 280*
automobiel, *21*
AWS Ocean Energy, *191, 196, 197*

B

Bacon, Francis Thomas, *83*
BAPS (Beyond Alt. Policy Scenario), *66, 67, 68*
Baumgärtner, Jörg, *182, 185, 186*
Beckett, Margaret, *57*
Benz, Karl, *21, 210*
benzine, *24, 43, 64, 84, 119, 120, 122, 123, 127, 236, 276*
Berkel, *222*
bevolkingsgroei, *19, 57, 62*
bijstook, *98, 119*
Bin Talal, El Hassan, *161*
Bintulu, Maleisië, *127*
Bio-Botlek, *130*
biobrandstof, *43, 64, 94, 98, 111, 118, 119, 121, 122, 125, 129, 130, 261*
biodiesel, *92, 93, 119, 127, 128, 270*
bio-ethanol (ethanol) *119, 120, 121, 123, 130*
biogas, *100, 102, 130, 252, 265, 275, 278*
biomassa, *44, 64, 65, 74, 99, 101, 102, 103, 110, 112, 113, 114, 115, 118, 119, 125, 127, 129, 130, 165, 188, 249, 253, 260, 261, 262, 265, 275, 294*
Biomassa Technologie Groep (BTG), *110, 111, 112, 113, 114, 115, 274*
biomassacentrale, *95, 96, 98*
bio-olie *(zie ook pyrolyseolie)*, *110, 111, 112, 114, 265,*

bioraffinage, *130*
Blok, Kornelis, *87*
blow-out, *188*
Blue Energy, *202, 203, 204, 205, 206*
Blue Stream gaspijplijn, *40*
Boer, Petra de, *189*
boiler, *207, 219, 229, 230, 236, 242, 243, 271*
Bongaerts, Martijn, *214, 219*
Borssele, *164, 165, 171, 173, 174, 178, 200, 250, 254, 269*
Bosch, Carl, *25*
brandstofcel, *44, 45, 46, 77, 80, 81, 83, 84, 149, 202, 275*
Brazilië, *43, 119, 120*
Bremer, Jan van den, *231, 232, 274*
British Nuclear Group, *178*
British Petroleum (BP), *36, 42, 90*
broeikaseffect, *9, 10, 13, 47, 48, 51, 52, 56, 86, 87, 113, 134, 154, 212, 250, 265, 268, 275, 278*
broeikasgas, *10, 12, 13, 15, 16, 17, 36, 47, 48, 52, 53, 54, 55, 57, 61, 68, 69, 70, 87, 249, 254, 267*
Buisman, Cees, *204*
Bulder, Henk, *95, 96, 97, 98, 274*
Burg, Job van den, *93*
Burronga (Australië), *158*
bus, *82, 208, 209, 212, 213*
Bush, George W., *28, 29, 42, 43, 86, 121, 175*

C

Californië, *11, 50, 52, 81, 154, 156*
calorie, *18*
Camp, Huub op de, *122*
Carnotcyclus, *216, 274*
Castricum, *234, 235, 237, 251*
CATO-project, *87, 274*
CdTe, *147*
cellulose, *121, 122*
Cerenkovstraling, *164*
CESA-1, *154*
Cheney, Dick, *42*
China, *36, 39*
Choren, *127*
Christensen, Torben, *12, 13*
CIEMAT, *156*
CIGSS, *147*
City Car, *211, 212,*
Club van Rome, *75, 133, 161*
CO2-vrij kantoor, *230, 231*
Codée, Hans, *171, 172, 174, 177, 179, 181, 274*
Coefficient of Performance (COP), *226*
Continuon, *214, 219*
Cordoba, *159*
COVRA, *162, 171, 172, 173, 177, 179, 274*
Critical Infrastructures for Sustainable Power (CRISP), *242*
Crutzen, Paul, *47*
Cuba, *195*

D

Daey Ouwens, Kees, *102, 130, 131, 260, 274*
Daimler, Gottlieb, *21*
Daimler-Benz, *21*
Daimler-Chrysler, *81*
dansvloer, duurzame, *293*
Darfur, *56, 57*
Darwin, *135*
Davey, Roger, *158, 159*
Deffeyes, Kenneth, *31, 32, 33, 34, 90, 291*
Demollin-Schneiders, Elliane, *183*
Den Uyl, Joop, *133, 183*
Denemarken, *134, 137, 138, 197, 200*
Department of Energy (DoE), *176*
deuterium, *166, 167, 175, 176, 275*
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), *142, 156, 160, 250*
Deutz AG, *21*
Deventer Ziekenhuis, *190*
diesel, *79, 116, 118, 119, 122, 125, 126, 127, 128, 133, 208, 209, 210, 212, 213*
Diesel, Rudolf, *21*
Drake, Edwin L., *20, 31*
Drente, *104, 108*
droge destillatie, *125, 278*
Duitsland, *11, 25, 38, 40, 119, 125, 138, 143, 144, 151, 170, 184, 186, 270*

duurzame energie, *5, 17, 73, 74, 75, 119, 125, 130, 140, 143, 144, 153, 161, 194, 249, 251, 264, 265, 268, 269, 276*
duurzame mobiliteit, *116*

E
Ecofys, *87, 119, 130, 199, 223, 274*
Econcern, *135, 199, 223*
Ecoventures, *135*
Edison, Thomas Alfa, *20*
Egmond, *133, 136*
Egypte, *160*
Eisse, Henk, *104, 105, 106, 107, 108*
elektron, *79, 84, 147, 148, 149, 150, 164, 167, 176, 276*
Emanuel, Kerry, *56*
emissiehandel, *59, 91, 264*
Eneco, *214*
energie, *5, 6, 7, 14, 15, 17, 18, 19, 24, 36, 39, 42, 43, 44, 45, 61, 62, 64, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 91, 93, 98, 99, 108, 109, 113, 114, 119, 120, 121, 122, 125, 134, 137, 145, 147, 149, 153, 154, 155, 159, 160, 161, 166, 167, 168, 169, 175, 176, 189, 190, 191, 193, 196, 197, 204, 206, 208, 209, 219, 220, 222, 224, 225, 226, 227, 230, 231, 235, 236, 237, 238, 246, 248, 249, 251, 252, 253, 260, 261, 262, 263, 265, 269, 270, 271, 277*
energiebesparing, *27, 44, 66, 92, 133, 221, 251, 253*
energiebuffer, *246*
energiedoelstellingen, *222, 264*
energiemix, *65, 67, 187, 251, 252, 254*
Energieonderzoeks Centrum Nederland (ECN), *55, 77, 80, 81, 87, 100, 101, 103, 122, 125, 128, 145, 172, 202, 228, 234, 240, 241, 270*
energierevolutie *6, 9, 69, 260, 262, 268*
energieteelt, *108*
energietestwoning, *228*
Energiewende zur Nachhaltigkeit, *260, 292*
Energy Revolution, *249, 250, 292*
Engdahl, Frederick William, *42, 43*
EnviroMission, *157, 158, 159*
Enviu, *238*
ESPO (East Siberian Pacific Ocean), *39*
Essent, *214, 244*
ethanol, *43, 64, 92, 93, 118, 120, 121, 122, 123, 270, 276*
e-Traction, *208, 213*
Eurajoki, *180*
European Marine Energy Centre (EMEC), *200*
European Pressurised water XE "water" Reactor (EPR), *165, 269*
Eurotop, *264*

F
Faraday, Michael, *217*
Feron, Paul, *86, 89*
fiets, *14, 96, 237, 270, 271*
Finland, *114, 165, 180, 181, 269*
Fischer-Tropsch reactie, *112, 127, 128, 130, 276*
Fiwihex, *227*
Fleischmann, Martin, *175*
Flevoland, *190*
flow battery, *78, 79, 189, 275*
Fluisterbus, *208, 210, 212, 213*
folie, *5, 84, 204, 205*
Ford, Henri, *22*
fossiele brandstof, *5, 17, 26, 35, 46, 47, 51, 62, 67, 71, 73, 74, 82, 86, 90, 118, 123, 125, 130, 263, 276*
foton, *148*
fotosynthese, 50, 73, 92, 148
fotovoltaïsch (PV), *153, 157*
Fraser, Dan, *188, 189*
Fridleifson, Gudmundur Omar, *187, 188, 189*
Frisia, *204, 205*
Fugro, *36*

G
G8, *61, 69, 251*
Gambarota, Lucien, *237*
gammastraling, *176, 275*
Gardner, Fred, *192, 193, 194, 196*
gashydraat, *35, 36, 276*

gasmotor, *20, 21, 22, 106, 114*
Gasterra, *87, 100, 102, 214*
Gazprom, *40, 42*
Geel, Pieter van, *118, 163*
Genting groep, *113, 114*
geothermisch, *184, 185, 186, 184, 186, 187, 276*
GeslotenKas, 223, 224
gevelkachel, *236*
Giesen, Henri, *214, 215, 219, 220, 244*
Glaspie, April, *28, 29*
glastuinbouw, *222, 224, 227*
Golf van Mexico, *31, 56*
Gore, Al, *6, 61*
grassen, *121, 122, 128*
Grätzel, Michael, *148, 150*
Grätzelcel, *148, 150*
Greenfuel Technologies (Mass.), *92, 93*
Greenpeace, *87, 179, 249, 250, 251, 252, 253*
groen fossiel, *86, 87, 276*
groen gas, *100, 101, 102, 125, 270, 276*
Groene OPEC, *114*
groene steenkool, *262*
groene stroom, *64, 82, 107, 114, 143, 232, 269*
grondwater, *176, 183, 184, 190, 223, 224,*
GTL (gas-to-liquid), *127*
guano, *25*

H
Haber, Fritz, *25, 26*
Haber-Bosch proces, *25*
HABOG, *171, 173, 174*
Hagen, Tim van der, *162, 163, 164, 165, 166, 248*
Hague, La, *172, 173, 179*
Hardeveld, Martijn van, *126, 127*
Harlingen, *204*
Hazewinkel, Obbo, *93*
Heerlen, *183, 184*
Heinberg, Richard, *24, 291*
Heinen, Arjan, *208, 209, 210, 212, 213*
heliostats, *154, 155, 156, 276*
Heuvel, Eric van den, *119, 130*
Hill, Jason, *121, 122*
Hommelberg, Maarten, *240, 241, 242, 244*
Hong Kong, *60, 237*
Hot Dry Rock, *185*
hot-fill, *237, 271*
hout, *19, 74, 95, 96, 97, 98, 102, 103, 110, 112, 113, 118, 119, 127, 128, 228, 261*
houtsnippers, *95, 96, 100, 101, 110, 111, 113, 125*
houtvuurtjes, *74, 118, 265*
Hubbert, M. King, *31, 32, 33, 291*
Hudson, Geoff, *181*
Huisman, Stef, *222, 227*
Huissen, *222, 227*
Hussein, Saddam, *28, 29, 30*
hybride auto, *82, 276*
Hydro Huisman, *222, 227*
Hydrogen Solar, *149, 150, 151*
hydrolyse, *44, 45, 84*

I
Iceland Deep Drilling Project (IDDP), *187, 189*
IEA, *17, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 68, 87, 88, 129, 145, 186, 249, 251, 252, 253, 254*
IJsland, *46, 82, 186, 187, 188, 189*
IMARES, *139*
Inconvenient Truth, An, *61*
India, *43, 62, 63, 64, 88, 118, 195*
industriële revolutie, *19, 54, 260*
inflatie, *27, 28*
Innogrow, *223, 224*
intelligente stroommeter, *220, 245*
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *5, 13, 49, 51, 53, 58, 60, 66, 67, 68, 69, 267,*
Irak, *27, 29, 30, 33, 39, 42*
Iran, *27, 29, 42, 127, 180*
ITER (Int. Tokomak Exp. Reactor), *167, 168*

J
Jacobson, Mark Z., *123*
jatropha, *130, 260*
Jeltsin, Boris, *41*
JET (Joint European Torus), *168*

Joint Implementation (JI), *16*
Jorritsma, Annemarie, *190*
Joule, *18, 277*
Joule, James Prescott, *18*

K
Kalkar, *170, 255*
Kan, Wim, *38*
Kas als Energiebron, *158, 222*
katalysator, *84, 102, 115, 126, 276*
Katar, *127*
Keeling, Charles David, *9, 16, 50, 51*
Keelingcurve, *16, 51, 54*
Kema, *87, 203, 227, 246*
kernafval, *180, 181*
kernenergie, *18, 65, 71, 162, 163, 164, 165, 166, 168, 169, 171, 173, 181, 251, 252, 254, 259, 261, 262, 277*
kernfusie, *166, 167, 168, 277*
kernfusie, koude, *71, 175, 176, 177*
kernreactor, *163, 171, 216, 277, 280*
kernsplijting, *166, 169, 169, 277*
Kernwasser Wunderland, *255*
kerosine, *24, 125*
kettingreactie, *169, 277*
Kirpotin, Sergei, *10, 11*
KIVI-NIRIA, *163, 164, 249, 250, 251, 252, 253, 254*
Kiwa-Gastec, *214, 219*
Klaver-10, *134*
Kleine Aarde, De, *134*
koe, *104, 106, 107*
koelvloeistof, *170, 225, 226*
Koeweit, *28, 29, 38*
kolencentrale, *88, 167*
kolengas, *19, 21, 25, 125, 276, 278*
kolenmijn, *19*
Koninklijke/Shellprijs, *112*
kooldioxide (CO_2), *10, 12, 37, 47, 48, 53, 54, 55, 60, 67, 74, 85, 87, 88, 89, 92, 101, 102, 111, 115, 123, 188, 275, 276, 278*
Kornegay, Francis, *57*
Koude Oorlog, *28*
koudebuffer, *223, 224*
Krafft, Katia en Maurice, *185*
Krafla vulkaan, *188*
kraker, *112, 127*
Krijgsman, Josien, *203*
kryptonglas, *230*
kweekreactor, snelle, *169, 170, 254, 255, 278*
Kyoto-protocol, *15, 54, 58, 63, 92*

L
laddermolen, *140, 141*
Laden, Osama bin, *29, 30*
Lagerweij, *134, 135, 193*
landbouw, *15, 16, 27, 120, 122, 257, 258*
leem, *232*
Lelystad, *95, 98, 99*
Lenstra, Jip, *87*
Lievense, *246, 247, 258, 269*
Liquicell, *86*
lithium, *166, 167, 278*
Lommers, Nico, *192, 193, 194*
Lovelock, James, *163*
Lubbers, Ruud, *28, 164, 227*
luchtvervuiling, *119, 123, 261*
Lula (da Silva), *43*
Lymfjord, *197*
Lysen, Erik, *87, 89, 90, 91, 92*

M
Maasvlakte, *89, 130*
Macedo, Carvalho, *120*
Mäckel, Helmut, *159*
Madsen, Friis, *198*
maïs, *94, 104, 106, 120, 121, 122*
Maleisië, *113, 114, 118, 127*
Mallant, Ronald, *77, 78, 81, 82*
Markermeer, *246*
Marokko, *160*
Marsdiep, *193, 194*
Massachusetts Institute of Technology (MIT), *56, 210, 211*
Maybach, Wilhelm, *21*
Mayer, Julius Robert von, *17, 18*
Meij, Janita de, *189*
membraan, *79, 84, 203, 204*
mens, *5, 24, 66, 238, 244*
mentaliteit, *70, 179*

MEP-subsidie, *107, 111, 114, 269*
mest, *5, 25, 74, 104, 105, 106, 108, 113, 118, 269*
methaan (CH_4), *10, 11, 12, 13, 17, 35, 36, 37, 48, 54, 90, 100, 101, 102, 104, 109, 111, 115, 125, 275, 276, 278*
methaanhydraat, *36*
Meulman, Brendo, *108, 109*
microgrid, *245*
micro-wkk, *207, 214, 218, 219, 220, 221, 233, 242, 243, 244, 245, 253, 278*
Midden-Oosten, *27, 28, 29, 30, 43, 44, 142, 160, 161*
Mildura (Australië), *158, 159*
Mills, Randell, *176*
Mojave woestijn, *154, 156*
Monju, *170*
Montana, *85, 128*
moraal, *70*
Mosier-Boss, Pamela, *176*
Most, Hennie van der, *170*
Mozzafarian, Hamid, *273*
Mtoe, *64, 278*
NAM, *87*
NASA, *83, 188*

N
Nationaal Milieubeleidsplan (NMP), *134*
Nationaal Onderzoeksprogramma Windenergie (NOW), *133*
National Renewable Energy Laboratory, *128*
natrium, vloeibaar, *170, 174, 278*
NDSM-eiland, *234*
NECAR, *81*
Nedalco, *123*
Nedwind, *135*
NEPG (North European Gas Pipeline), *39*
neutron, *166, 168, 275, 278*
New Orleans, *55, 61*
Newton, *18, 276, 278*
Newtonmeter (Nm), 1*8, 278*
Nieuwenhout, Frans, *240, 241, 242, 243, 245*
NLR, *134*
Nobel, Ludwig, *20*
Nobelprijs, *25, 49*
Noord-Afrika, *57, 142, 160, 161, 252, 264, 265*
Noordzeewind, *133, 138, 140*
Nuon, *95, 96, 99, 133*
Nyos, Kameroen, *89*

O
Oak Ridge National Laboratory, 1*76, 179*
Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC), *194, 195*
Ockels, Wubbo, *140, 141*
Oekraïne, *38, 40*
OESO, *17, 63, 65*
Oever, Den, *193, 194*
OLGA gaswasser, *102*
olie, *5, 6, 19, 20, 21, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 36, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 90, 92, 102, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 119, 120, 130, 154, 156, 157, 182, 186, 194, 213, 234, 253, 262, 278, 280*
olieboycot, *27, 38*
oliebron, *20*
olieprijs, *26, 27, 28, 39, 42, 62, 122, 128*
olifantenpoep, *122*
ontzilting, *205*
Opdam, Hans, *223*
OPEC, *27, 28, 114*
Orkaan Katrina, *6, 55, 61*
Orkney, *191, 197, 200*
Osprey, *201*
Otto, Niklaus, *20, 21, 22*
Oudakker, Gerrit, *203, 205*
oven, *96, 97*
Own Eyes Experience, *116*
oxyfuel, *89*

P
paardenkracht (pk), *238, 278*
Pacala, Stephen, *256, 257, 258, 259*
palmolie, *113, 114*
palmtrossen, *113, 114*
paraffine, *126*
Peabody Coal, *128*

Pearce, Fred, *10, 11, 12, 13, 54, 267*
Pelamis, *200*
Pelletière, Stephen C., *29*
permafrost, *5, 10, 12, 278*
Persson, Göran, *43*
Planta Solar Thermica, *154*
plantaardige olie, *116, 117, 119, 234*
plasma, *167, 168, 279*
Platform Nieuw Gas, *102*
platina, *84*
ploegen, *257*
plutonium, *169, 178, 254, 277, 279*
Poetin, Vladimir, *39, 41*
polymeer, *203, 204*
Pons, Stanley, *175*
Portugal, *160, 196, 197, 198, 200*
Posiva Oy, *180*
Post, Arno, *133, 140*
Post, Jan, *202, 203, 204, 205*
Powell, Colin, *30*
power tower, *159*
PowerMatcher, *242*
ppm (parts per million), *49, 50, 51, 52, 54, 55, 58, 60, 67, 68, 256, 267, 279*
Pratt & Whitney, *83*
Princeton, Universiteit *31, 256, 257*
Prins Claus, *234*
Prins, Wolter, *75, 110, 112, 113, 114, 115*
Pronk, Jack, *122, 123*
proton, *84, 276, 279, 280*
PSA (Production Sharing Agreement), *41*
Puddingfabriek, De, *108*
Purmerend, *192*
PvdA, *166*
pyrolyse, *110, 113, 114, 115*
pyrolyseolie, *111, 112, 113, 114*

Q
Q7, *136*

R
Rabo vastgoed, *227*
radioactief afval, *167, 171, 172, 177, 179, 180*
raffinage, *20, 22, 112, 130*
Rankine-cyclus, organische, *184*
Rau, Thomas, *231*
Reagan, Ronald, *28*
referentiescenario, *61, 62, 63, 64, 65, 67, 69, 249, 253, 256, 257*
regenerator, *218*
Reijnders, Lucas, *238*
rendement, *18, 19, 62, 65, 66, 77, 78, 82, 98, 102, 125, 126, 145, 146, 147, 149, 155, 156, 157, 158, 164, 195, 208, 209, 210, 214, 216, 218, 222, 226, 230, 236, 263, 265, 271, 274, 275, 279, 280*
Rifkin, Jeremy, *44, 45*
Roebroeck, Eugene, *93*
roetfilter, *212*
Romero, Manuel, *156*
Rooijen, Huub den, *133, 135, 138, 139*
rookgassen, *88, 89, 92, 97, 118*
Roos, Johan, *116, 117, 118*
Ross, Rob, *203*
Rossen, Eric, *200*
Rothschild, Fam., *20*
Rumeilah olieveld, *28*
Rusland, *38, 39, 40, 41, 42, 44, 102, 114, 127, 168, 179, 180*

S
Sachalin, *40,41*
Sachs, Jeffrey, *42, 43*
salpeterzuur, *25, 178*
Scheijgrond, Peter, *199, 200*
Schlaich, Jörg, *158*
Schröder, Gerhard, *40*
Schweitzer, Brian, *85, 128*
scrubben (van gas), *88, 91*
Sellafield, *172, 173, 178, 179*
SenterNovem, *93*
Sevilla, *159*
Shaw, George Bernard, *191, 197*
Shell, *20, 32, 36, 39, 40, 41, 42, 82, 86, 87, 112, 126, 127, 128, 133, 145, 213*
Siberië, *5, 10, 11, 13, 39, 40*
Sijpheer, Niels, *228, 230, 233*
silicium, *145, 146, 147, 148, 279*
Sinke, Wim, *145, 151*
Sjoerdsma, Evert, *234, 235, 236, 251*

Smart Energy Mix, *249, 253, 254*
smartgrids, *240*
Smil, Vaclav, *25*
Smith, Larry, *11*
smog, *123*
smoorventiel, *226*
Sneek, *108, 109*
Socolow, Robert, *256, 257, 258, 259*
SOLAIR, *156*
Solucar, *155*
sonoluminescentie, *177*
Sorensen, Hans Christian, *198*
Soulz, *185*
spaarlamp, *235, 237, 271*
Spanje, *151, 154, 158, 159, 160*
sportschool, *237, 238*
stabilisatieniveau, *55, 60, 267*
Standard Oil, *20*
Stassen, Huub, *112*
steenkool, *5, 19, 44, 45, 62, 63, 65, 76, 86, 88, 90, 126, 128, 159, 167, 251, 252, 254, 262, 263, 276, 278, 280*
steenkoolmijn, *183*
Stern, Nicholas, *47, 57, 58, 59, 68, 250*
Stern-rapport, *250*
stikstof (N_2), *25*
Stirling, Robert en James, *216, 218*
Stirlingmotor, *215, 216, 217, 218, 219*
stoom, oververhit, *97, 188*
stoommachine, *19, 20, 47, 216*
Storegga slide, *37*
stripper, *86*
stroomboot, *189, 190*
stroommarkt, *138, 242*
stroomvoorziening, *79, 151, 200, 232, 237, 240, 241, 245, 246, 253*
Sudurnes Regional Heating, *187*
suikerbiet, *123*
suikerriet, *119, 120, 121, 259*
Suikerunie, *123*
Super Phénix, *170*
superkritisch, *115, 188, 189, 279*
Swaaij, Wim van, *112*
Swart, Dick, *232*
synthesegas, *112, 277, 279*
synthetisch natuurlijk gas (SNG), *101, 278, 279*
Szpak, Stanislaw, *176*

T
Tabernas woestijn, *153*
Taleyarkan, Rusi, *176*
Teamwork Technologies, *193*
Texas, *23, 31*
Thatcher, Margareth, *28*
Themato, *222, 223, 224*
Thermalbaden, *184*
Tilman, David, *121, 122*
TNO, *86, 87, 89, 189, 190, 208*
Tohidi, Bahman, *37*
transportsector, *119, 253*
Trias Energetica, *92*
Trieb, Franz, *142, 160, 161*
tritium, *166, 176, 179, 278, 280*
tsunami, *246*
TU Delft, *23, 36, 122, 134, 141, 162, 163, 246, 248*
turf, *11, 13, 108, 118, 280*
Turkenburg, Wim, *87*
Tyndall, John, *48*

U
United States Geological Service (USGS), *32*
Universiteit Twente, *110, 112, 134*
uranium, *159, 168, 169, 178, 179, 181, 254, 277, 278, 279, 280*

V
vanadium, *79*
Vanadium Redox Battery, *79*
Veer, Jeroen van der, *16, 17*
Vellinga, Pier, *16, 17*
verbrandingsmotor, *20, 21, 210, 215, 216, 218, 277*
vergassing, *115, 125, 130, 280*
Verne, Jules, *44, 76*
verslaving, *6, 14, 15, 19*
Vestas, *136*
virtuele centrale, *242, 243, 244, 245*
voedselproductie, *26, 261*

Volker Wessels, *203, 205*
VPRO, *177*
VRB Power Systems, *79*

W
Waddenzee, *193, 194*
Wageningen Universiteit (WUR), *109, 204*
walvisvaart, *20*
warmte, *10, 18, 19, 44, 48, 53, 59, 66, 73, 77, 84, 95, 98, 107, 115, 116, 119, 129, 155, 157, 158, 164, 168, 171, 174, 175, 176, 183, 184, 186, 187, 190, 194, 195, 206, 210, 214, 215, 216, 218, 219, 220, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 229, 230, 232, 236, 238, 241, 242, 243, 253, 264, 269, 271, 275, 276, 277, 278, 280*
warmtebuffer, *190, 223, 224*
warmtekrachtkoppeling (wkk), *130, 214, 215, 219, 233, 241, 253, 263*
warmtepomp, *225, 226, 229, 230, 232, 280*
warmtewisselaar, *155, 195, 225, 226, 227, 280*
water, *5, 11, 18, 37, 44, 45, 53, 56, 60, 73, 76, 77, 84, 92, 97, 105, 109, 115, 120, 122, 126, 133, 135, 144, 150, 151, 155, 157, 161, 164, 165, 169, 170, 175, 183, 184, 185, 187, 188, 189, 190, 191, 193, 194, 196, 198, 199, 200, 202, 203, 204, 205, 206, 224, 225, 227, 228, 229, 232, 233, 235, 237, 246, 270, 271, 275, 277, 279, 281*
waterkrachtcentrales, *44, 64, 74, 137, 187, 252, 260, 261*
waterstof (H_2), *25, 44, 45, 46, 76, 77, 78, 80, 82, 83, 84, 89, 101, 102, 111, 115, 125, 126, 149, 150, 151, 160, 166, 175, 176, 179, 188, 189, 280*
waterstofauto, *46, 80, 81, 82, 149*
waterstroom, *202*
waterturbine, *192, 193*
Watt, *19, 37, 145, 146, 174,*
Watt, James, *19*
Wave Dragon, *197, 198*
Wave Rotor, *199, 200*
Wavegen, *201*
wereldenergievoorziening, *64*
Wereldnatuurfonds (WNF, WWF), *231, 232*
Wetsus, *202, 203, 204, 205*
WGBU, *260, 261, 262, 263, 264, 265*
Whisper, The, *208*
Whispertech, *214*
Wijffels, René, *93*
Willems, Rein, *213*
windenergie, *5, 44, 65, 74, 79, 132, 133, 134, 136, 137, 138, 139, 140, 165, 195, 199, 201, 244, 246, 249, 252, 260, 269*
Windmaster, *135*
Windscale, *178*
Woodring, Doug, *237*
World Energy Assessment, *260*
World Energy Outlook, *61, 87*

X
xylose, *122*

Y
Y-12 XE "12" National Security Complex, *179*
Yucca gebergte, *180*

Z
Zarza, Eduardo, *157, 160, 260*
Zeeuws Vlaanderen, *247*
Zeton, *113*
zonnecel, *146, 147, 148, 149, 280*
zonnecollector, *144, 194, 223, 229, 281*
zonnecollector, Groene, *93*
zonne-energie, *5, 44, 73, 144, 145, 151, 152, 153, 165, 260, 262, 265*
zonnehuis, *234, 236, 237*
zonneterp, *222*
zonnetijdperk, *144, 260, 265*
zonnetoren, *155, 156, 158, 159, 277*
zonnetrog, *156, 157*
zoutlaag, *181*
Zwart, Robin, *100, 122, 128*
Zweden, *12, 43, 48, 52*

Literatuurlijst

Wim van Arkel e.a., *Dutch Energy Policies from a European perspective*. Major Developments in 2003. Petten 2003.

Kenneth S. Deffeyes, *Beyond Oil. The View from Hubbert's Peak*. New York 2005.

Jared Diamond, *Collapse. How Societies Choose to Fail or Succeed*. New York 2005.

Energy Mix. Publicatie naar aanleiding van jaarcongres KIVI NIRIA. Den Haag 2006.

European Commission, *European Technology Platform SmartGrids. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. Luxemburg 2006. (EUR 22040).

European Commission, *A Vision for Photovoltaic Technology*. Luxemburg 2005. (EUR 21242).

André Faaij e.a., *Synthese van het project: Beschikbaarheid van biomassa voor energieopwekking*. Utrecht/Petten/Wageningen 2000.

German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and Technology Assessment, *Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power*. Berlijn 2006.

J.A. Halkema, *Windmolens. Fictie en feiten*. Delft 2000.

Susan Joy Hassol, *Impacts of a Warmer Arctic. Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge 2004.

Herman Jansen & Jeroen Jansen, *Utrecht aan Zee. Gevolgen van de klimaatverandering voor Nederland*. Eindhoven 2003.

Salomon Kroonenberg, *De menselijke maat. De aarde over tienduizend jaar*. Amsterdam 2005.

Richard Heinberg, *The Party's Over. Oil, War and the Fate of Industrial Societies*. Gabriola Island 2003.

Richard Heinberg, *Powerdown. Options and Actions for a Post-Carbon World. Gabriola Island* 2004.

R.G.W. Hisgen & R.W.P.M. Laane, *Geheimen van de zoute zee. Het zout in de zee: mythen en feiten*. Diemen 2006.

M. King Hubbert, *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*. Houston 1956.

Richard Koch & Chris Smith, *Suicide of the West*. London 2006.

James Lovelock, *The Ages of Gaia. A Biography of Our Living Earth*. Oxford 1988.

James Lovelock, *Hommage to Gaia. The Life of an Independent Scientist*. Oxford 2000.

Erik Lysen and Benno Wiersma, *PV roadmap for the Netherlands*. Utrecht, 2002.

Kees Daey Ouwens, *Wegen naar een duurzame energievoorziening. Betaalbaar, betrouwbaar en schoon*. Eindhoven 2004.

Fred Pearce, *Last Generation. How Nature Will Take Her Revenge for Man-Made Climate Change*. London 2006.

Robert Priddle (ed.), *World Energy Outlook 2006*, Internationaal Energie Agentschap, Parijs 2006.

Lucas Reijnders, *Energie. Van brandhout tot zonnecel*. Amsterdam 2006.
Jeremy Rifkin, *The Hydrogen Economy The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*. New York 2002.
Daniel Sperling, *Future Drive. Electric Vehicles And Sustainable Transportation*. Washinton 1995.
Nicholas Stern, *The Economics of Climate Change. The Stern Review*. Cambridge 2007.
Sven Teske, *Energy Revolution., A Sustainable Pathway to a Clean Energy Future for the Netherlands*. Amsterdam 2006.
G. Verbong e.a., *Kwestie van lange adem. De geschiedenis van duurzame energie in Nederland*. Boxtel 2001.
Marek Walisiewicz, ***Alternative Energy. A Beginner's Guide to the Future of Technology***. New York 2002.
M.T. Westra & S. Kuyvenhoven, *Energy, Powering Your World*. Rijnhuizen 2002.
Ad van Wijk en David de Jager, *Poseidon, Sustainable energy supply sets out to sea, Econcern*. Utrecht, 2006.
Caroline Williams, 'Deap Heat', *New Scientist*, 14 aug 2004, 38-41.
Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), *Welt im Wandel. Energiewende zur Nachhaltigkeit*. Berlijn 2003.

Tijdschriftafleveringen

Dossier Energie-Toekomst, *De Ingenieur*, 6 okt 2006.
Dossier Zonne-energie, *De Ingenieur*, 14 jul 2006.
Hybrid Future, *Newsweek*, 6 sept 2004.
Special Energie, *Technisch Weekblad*, 7 okt 2006.

Weblinks

Voor energienieuws en reacties	**www.energierevolutie.net**

Leuk

Energienieuws via web-tv	**www.new-energy.tv**
Bereken uw eigen CO_2 uitstoot	**tinyurl.com/n4k6t**
Hoe techniek werkt	**www.howstuffworks.com**
Wat kun je zelf doen?	**ec.europa.eu/environment/climat/campaign/index_nl.htm**
Animatie Stirlingmotor	**www.keveney.com/Vstirling.html**
Wat doet de olie vandaag?	**www.oil-price.net**
Energie uit kleine waterstofjes??	**www.BlackLightPower.com**

Projecten

Eerste offshore windpark	**www.noordzeewind.nl**
Elektrisch aangedreven bus	**www.e-traction.nl**
CO_2-opslag project Nederland	**www.co2-cato.nl**
Energie uit golfdobber	**www.waveswing.com**
Energie uit opgestuwde golven	**www.wavedragon.net**
Luchtdruk uit golven	**www.wavegen.co.uk**
Organisatie voor aardwarmte	**geothermal.marin.org**
Aardwarmte in Jura	**www.soultz.net/version-en.htm**
Superkritisch boren in IJsland	**www.iddp.is**
Het nieuwe stroomnetwerk	**www.powermatcher.net**
Fabrikant flow batteries	**www.vrbpower.com**
Zonnetoren in Australië	**www.enviromission.com.au**
Nieuwste fusiereactor ITER	**www.iter.org**
Nederlandse info over kernfusie	**www.fusie-energie.nl/index.htm**

Instellingen

Duitse milieuraad voor regeringsbeleid	**www.wbgu.de**
Duitse Lucht- en Ruimtevaartcentrum	**www.dlr.de**
Europese Energie- en CO_2-beurs	**www.eex.de**
Nederlandse energie in cijfers	**www.energie.nl**
Europees energiebeleid	**ec.europa.eu/energy**
Europees centrum duurzame energie	**www.eurec.be**
Wereldwijde energie-info	**www.worldenergy.org**
Int. renewable energy magazine	**www.re-focus.net**
Duurzame energie in Europa	**re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/restat/restat.htm**
World Energy Agency rapport	**www.undp.org/energy/activities/wea/drafts-frame.html**