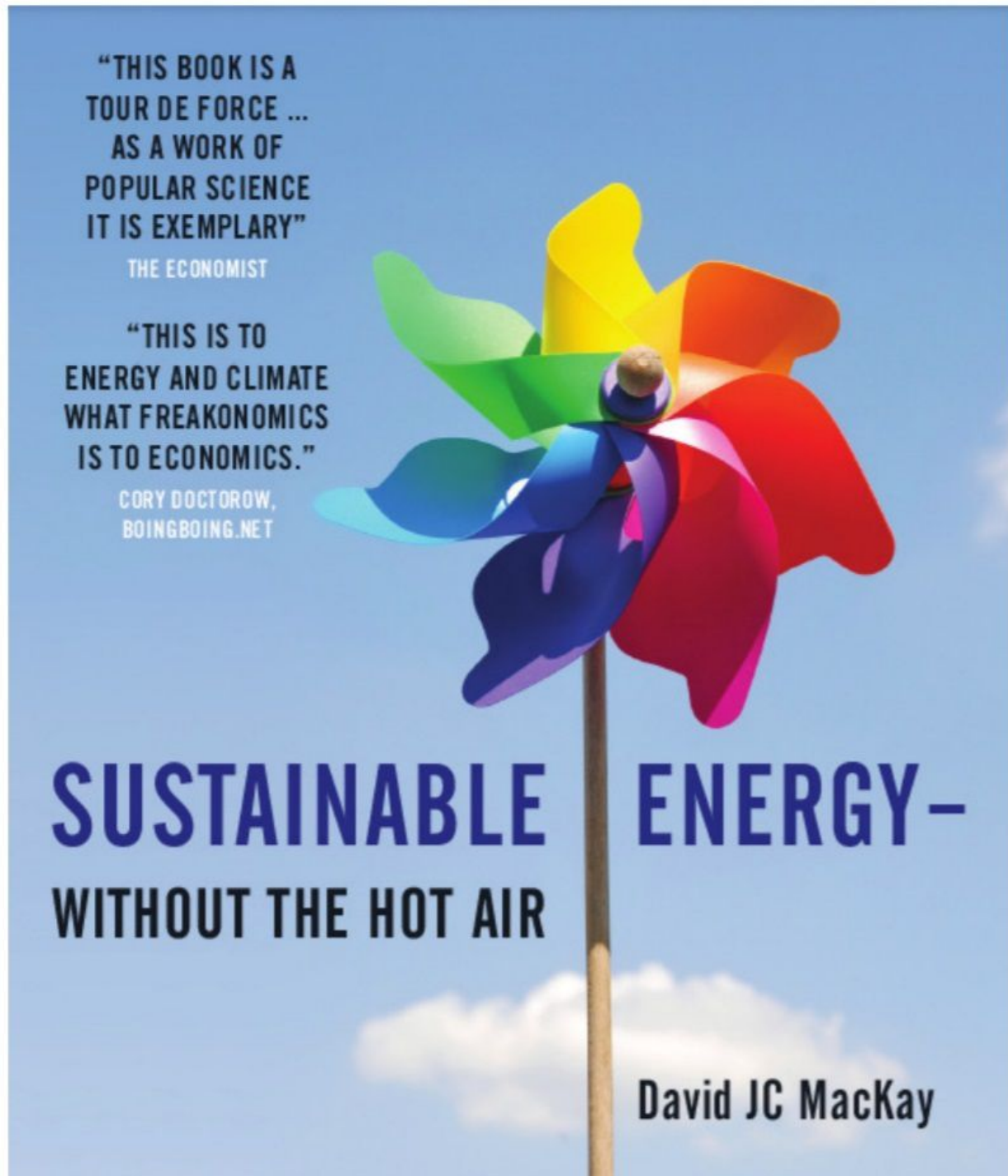


DUURZAME ENERGIEWINNING

zonder gebakken lucht



Nederlandse vertaling

Duurzame energieproductie - zonder gebakken lucht

David JC MacKay

Oorspronkelijke titel: 'Sustainable Energy – without the hot air '

Nederlandse vertaling door Jacob*

Opgedragen aan allen die niet het voorrecht hebben
van 2 miljard jaar gespaarde energiereserves

* Vertaald van 1e Duitse versie 26 November 2009
Nachhaltige Energiegewinnung – ohne die heiße Luft
Vertaler Dr. Thomas F. Kerscher

PDF versie lage resolutie 150 DPI / 80%

Voor het eerst gepubliceerd in het Verenigd Koninkrijk
in 2009.

UIT Cambridge Ltd.
PO Box 145
Cambridge
CB4 1GQ
England

Tel: +44 1223 302 041

Web: www.uit.co.uk

Copyright © 2009 David JC MacKay

All rights reserved.

ISBN 978-0-9544529-3-3 (paperback)

ISBN 978-1-906860-01-1 (hardback)

The right of David JC MacKay to be identified as
the author of this work has been asserted by him
in accordance with the Copyright, Designs and
Patents Act 1988.

While this publication intends to provide
accurate and authoritative information in regard
to the subject matter covered, neither the
publisher nor the author makes any
representation, express or implied, with regard
to the accuracy of information contained in this
book, nor do they accept any legal responsibility
or liability for any errors or omissions that may
be made. This work is supplied with the
understanding that UIT Cambridge Ltd and its
authors are supplying information, but are not
attempting to render engineering or other
professional services. If such services are
required, the assistance of an appropriate
professional should be sought.

Many of the designations used by manufacturers
and sellers to distinguish their products are
claimed as trade-marks. UIT Cambridge Ltd
acknowledges trademarks as the property of
their respective owners.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

3.5.2

INHOUD-LIJST

DUURZAME ENERGIEPRODUCTIE

ZONDER GEBAKKEN LUCHT

	(Deel-I) / (Deel-II) / (Deel-III) / (Deel-IV) /	Blz.	Duitse nr. []	www MacKay
XXXX	Voorwoord van de Duitse vertaler –		[iii]	
XXXX	Voorwoord van de auteur		[v]	
Deel I	getallen, geen bijvoeglijke naamwoorden		[001]	
Hfd.1.-	motivatie		[002]	page-2
2.-	de balans		[024]	page-22
3.-	auto's		[031]	page-29
4.-	wind		[034]	page-32
5.-	vliegtuigen		[038]	page-35
6.-	Solar / zonnepanelen		[042]	page-38
7.-	verwarming en koeling		[056]	page-50
8.-	waterkracht		[061]	page-55
9.-	licht		[064]	page-57
10.-	off-shore wind.		[068]	page-60
11.	kleine elektronica - gadgets		[077]	page-68
12.	golven		[082]	page-73
13.	voedsel en landbouw		[086]	page-76
14.	getijden		[092]	page-81
15.	dingen voor dagelijks gebruik		[101]	page-88
16.	geothermische energie		[110]	page-96
17.	Defensie en Universiteit		[115]	page-100
18.	Kunnen we leven van hernieuwbare energiebronnen?		[119]	page-103
▲				
Deel II:	De ommekeer in het energiebeleid - Het verschil maken		[129]	
19.	Elke grote stap telt		[130]	page-114
20.	beter vervoer		[134]	page-118

<u>21.</u>	intelligente verwarmingssystemen	Blz.	[158]	<u>page-140</u>
<u>22.</u>	efficiënt gebruik van elektriciteit		[173]	<u>page-155</u>
<u>23.</u>	duurzame fossiele brandstoffen?		[175]	<u>page-157</u>
<u>24.</u>	kernenergie?		[179]	<u>page-161</u>
<u>25.</u>	leven van de duurzame energie van andere landen?		[197]	<u>page-177</u>
<u>26.</u>	fluctuaties en opslag		[206]	<u>page-186</u>
<u>27.</u>	vijf energieplannen voor Engeland		[223]	<u>page-203</u>
<u>28.</u>	overweging van de kosten		[233]	<u>page-214</u>
<u>29.</u>	wat nu te doen		[241]	<u>page-222</u>
<u>30.</u>	energieplannen voor Europa, Amerika en de wereld		[250]	<u>page-231</u>
<u>31.</u>	Het laatste waar we over moeten praten		[258]	<u>page-240</u>
<u>32.</u>	Zeg ook ja		[268]	<u>page-250</u>
<u>xxxx</u>	Erkenningen - Met dank aan de auteur		[269]	<u>page-251</u>
<u>▲</u>				
<u>Deel III:</u>	Technisch aanhangsel		[271]	
<u>xxxx</u>	Bijlage A. Auto's II		[272]	<u>page-254</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage B: Wind II		[281]	<u>page-263</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage C: Vliegtuigen II		[288]	<u>page-269</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage D: Zonne-energie II.		[303]	<u>page-283</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage E: Verwarming II		[309]	<u>page-289</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage F: Golven II		[325]	<u>page-307</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage G: Getijden II		[329]	<u>page-311</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage H: Artikelen voor dagelijks gebruik II		[339]	<u>page-322</u>
<u>▲</u>				
<u>Deel IV:</u>	Nuttige gegevens		[344]	<u>page-328</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage I: Snelle referentie		[345]	<u>page-338</u>
<u>xxxx</u>	Bijlage J: Bevolkingsdichtheden		[354]	<u>page-342</u>
<u>xxxx</u>	Omzettingstabellen		[376]	<u>index</u>
<u>xxxx</u>	De energiegeschiedenis van Engeland		[358]	<u>page-370</u>
<u>xxxx</u>	Lijst van weblinks – niet geplaatst		[360]	<u>page-link</u>
<u>xxxx</u>	Bibliografie		[363]	<u>page-bio</u>
<u>xxxx</u>	Over de auteur		[375]	

Voorwoord bij de Duitse uitgave

Nog voordat ik "Duurzame energie - zonder gebakken lucht" van David MacKay had uitgelezen, was het mij duidelijk hoezeer een dergelijk boek al jaren ontbreekt in het Duitse debat over duurzame energiebronnen. Sommige verklaringen en bijdragen aan discussies van geëngageerde politici en milieu-activisten in de afgelopen jaren deden bij mij vaak de nekharen overeind staan wanneer ik probeerde na te gaan of ze vanuit wetenschappelijk oogpunt plausibel waren. Dit is waarschijnlijk hoe David MacKay zich voelde toen hij aan dit boek begon.

Aanvankelijk was ik alleen van plan enkele fragmenten uit Davids boek te vertalen en ze op een geschikte plaats op het web te zetten of ze aan vrienden te e-mailen. Vrienden waarvan ik zeker weet dat ze het goed menen met hun inzet voor een milieuvriendelijk energiegebruik. Vrienden met wie ik oprecht betreurt dat ze goed bedoeld en goed gezegd zijn, liggen soms zo ver uit elkaar.

Maar Davids boek is me bijgebleven en ik heb vele uren van mijn vrije tijd besteed aan het (grotendeels) volledig vertalen ervan. Op dit punt gaat mijn dank uit naar mijn familie, die mij deze vrije ruimte heeft gegeven en mij energetisch heeft gesteund.

Ik ken veel goede publicaties over energieproblemen en ik ben ervan overtuigd dat er nog veel betere zijn, die ik niet ken. In de afgelopen jaren is een stroom van onderzoeksresultaten op energiegebied tot stand gekomen en gepubliceerd in relevante tijdschriften. "Geen werk is af tot het papierwerk is gedaan" is een gezegde onder wetenschappers: geen onderzoek is af tot de resultaten zijn gepubliceerd. Maar niet alleen DAT wordt gepubliceerd, maar ook HOE. Idealiter moeten de resultaten zo worden gepresenteerd dat iedereen die belangstelling heeft ze kan begrijpen en doorgronden. In mijn ogen, is dit het echte genie van dit boek. Als geen ander weet David MacKay tot de kern door te dringen van de natuurkundige feiten die van belang zijn voor het energiebeleid, de hoofdzaken met een knipoog samen te vatten, en ze te presenteren in een stijl die gewoon leuk is om te lezen.

David MacKay schrijft expliciet voor mensen uit de praktijk, niet voor wetenschappers. Hij raadt aan zijn boek vooral te lezen voor kiezers en verkozenen die geïnteresseerd zijn in energiebeleid.

Ook al zijn sommige van de hier besproken benaderingen minder goed toepasbaar op de Duitse omstandigheden, de visie op het probleem, de aanpak en de behandeling van het bestaande potentieel zijn één op één overdraagbaar. Zeker, fotovoltäi-

sche energie mag dan in Duitsland al aanzienlijk meer ontwikkeld zijn (en alleen al door de geografische spreiding betere rendementen opleveren) dan in Engeland, en anderzijds mag golf- of getijdenenergie in dit land vrijwel geen rol spelen, maar het algemene energieprobleem en de verbijstering over hoe het op te lossen is hier grotendeels hetzelfde als daar.

Terwijl de Duitse regering nog steeds ruzie maakt over de ministeriële verantwoordelijkheid voor een energieplan, is Engeland al begonnen met de ontwikkeling en indiening van een dergelijk plan. Ook de Britse regering heeft op de inhoud van dit boek vertrouwd door David MacKay als regeringsadviseur in dienst te nemen.

[iv] Dit boek geeft de handvatten om de gepresenteerde basisoverwegingen, die verder gaan dan de Engelse omstandigheden, met precisie op de plaatselijke omstandigheden over te brengen. De volgende logische stap zal zijn om deze overdracht concreet te formuleren, hetgeen in een tweede Duitstalige editie van dit werk zal moeten worden opgenomen. Maar tot die tijd wil ik u, beste lezers, niet in spanning houden en daarom heb ik vandaag al deze eerste versie gepubliceerd.

Ik wens u veel plezier met het lezen van dit werk.

Dr. Thomas F. Kerscher Wang, 26 november 2009

Website over en met de 1e Duitse vertaling <http://www.energie.spoererau.de/index.html>

In het Duits vertaalde 2e versie dec. 2011 (ca. 12Mb.)

http://www.energie.spoererau.de/pdf/nachhaltige_energiegewinnung_a2.pdf

Supplementen Met toevoeging van de Duitse situatie

<http://www.energie.spoererau.de/downloads.html>

Extra met kleine eliloog Hoofdstuk 33 door Thomas F. Kerscher November 2013

<http://www.energie.spoererau.de/pdf/Epilog-Kap33-1.pdf>

Voorwoord van de auteur*

Waar gaat dit boek over?

Ik ben geïnteresseerd in het beperken van de nationale uitstoot van geklets - geklets over duurzame energie. Iedereen zegt dat het belangrijk is onafhankelijk te worden van fossiele brandstoffen, en we worden allemaal opgeroepen tot herbezinning, "to make a difference," zoals de Engelse slogan het kort en bondig omschrijft, maar veel van de veelgeprezen maatregelen dragen daar helemaal niet toe bij.

Er wordt momenteel vrij veel gekletst omdat veel mensen emotioneel worden (over windmolens en kernenergie bijvoorbeeld), maar niemand praat over cijfers. Of als iemand getallen noemt, kiest hij die om groots te klinken, indruk te maken, en zijn argumentatie kracht bij te zetten in plaats van tot een redelijke discussie te leiden.

Dit is een rechttoe rechtaan boek over getallen. Het doel is de lezer rond te leiden langs de valkuilen naar beleid dat echt een verschil maakt en beleid dat zijn deel doet. Op een plan dat werkt.



* **David MacKay** is helaas op 14 april 2016, vlak voor zijn 49 verjaardag, overleden.

Dit is een gratis boek

Het is niet geschreven om er geld aan te verdienen. Het is geschreven omdat duurzame energie belangrijk is. De originele Engelse versie kan gratis worden gedownload van <http://www.withouthotair.com/>)¹.

Dit is ook een vrij boek in ruimere zin: iedereen mag al het materiaal in dit boek vrij gebruiken, met uitzondering van cartoons en foto's van met name genoemde fotografen, onder de Creative Commons Naamsvermelding-Niet-Commercieel-licentie 2.0 UK: Engeland & Wales.²

1) 1 De huidige Duitse versie is ook beschikbaar op <http://www.energie.spoererau.de/index.html>

2 2 Hetzelfde geldt voor de huidige Duitse vertaling. De exacte licentievoorwaarden zijn in het Duits te vinden op

(De cartoons en foto's zijn buiten beschouwing gelaten omdat de makers alleen toestemming hebben gegeven voor gebruik in dit boek, maar niet daarbuiten). Iedereen is bijzonder welkom om het materiaal te gebruiken voor opleidingen en lezingen. Bovenstaande website bevat afzonderlijke hoge-resolutiebestanden van alle illustraties in dit boek.

Hoe dit boek te lezen

Sommige hoofdstukken beginnen met een citaat. Neem alstublieft niet aan dat citeren betekent dat ik het eens ben met de inhoud. Neem deze citaten als provocaties, als hypothesen die kritisch onderzocht moeten worden.

Veel van de eerste hoofdstukken (aangeduid met 1,2,3 ...) hebben langere technische secties (A,B,C ...) toegewezen gekregen. Deze technische gedeeltes beginnen op bladzijde [271].

Aan het eind van elk hoofdstuk staan verdere verwijzingen en een bibliografie en bronnen. Voetnoten worden door de auteur als verwarrend ervaren wanneer ze verspreid over de tekst staan; daarom zijn in het Engelse origineel geen voetnoten gebruikt. Voetnoten verwijzen dus altijd naar de aantekeningen van de vertaler.

Webadressen worden nog steeds in de tekst vermeld. Als een webadres onevenredig lang is, wordt de TinyURL-dienst gebruikt, zie <http://tinyurl.com/yh8xse>.

Feedback en correcties zijn altijd welkom. Er staan zeker rekenfouten in dit boek. In eerdere versies klopten sommige getallen niet met een factor twee. Hoewel ik hoop dat de resterende fouten aanzienlijk kleiner zijn dan dat, verwacht ik toch in de toekomst een aantal fouten te moeten corrigeren in het licht van nieuwe bevindingen.

Het origineel moet als volgt worden geciteerd:

David J.C. MacKay. *Duurzame energie - zonder de hete lucht*.

UIT Cambridge, 2008. ISBN 978-0-9544529-3-3.

Gratis online beschikbaar op

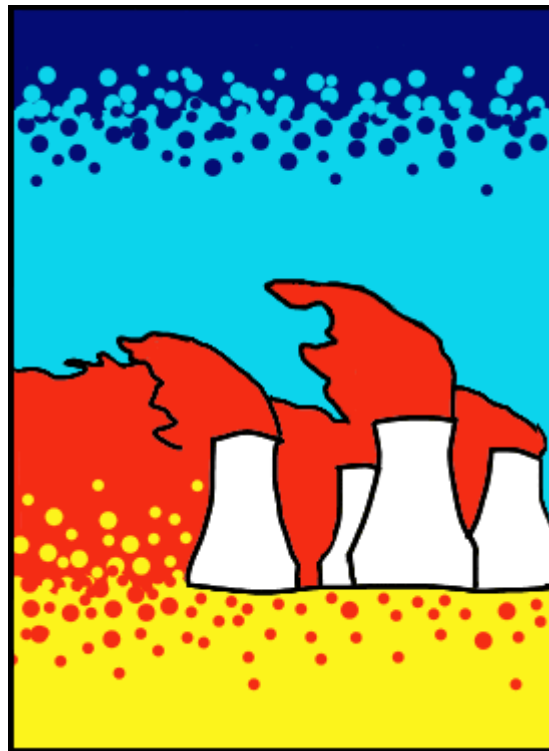
www.withouthotair.com.

[001]

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/legalcode> .

Deel I: kennismaking

Getallen, geen bijvoeglijke naamwoorden!



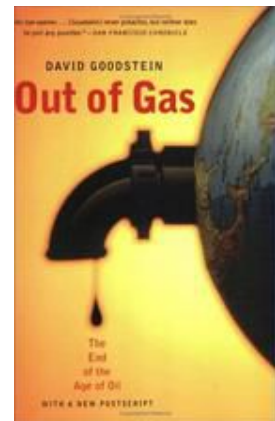
1 motivatie

Motivaties voor dit boek

We leven in een tijd waarin emoties en gevoelens meer tellen dan de waarheid, en er een enorme onwetendheid heerst over wetenschap.

James Lovelock

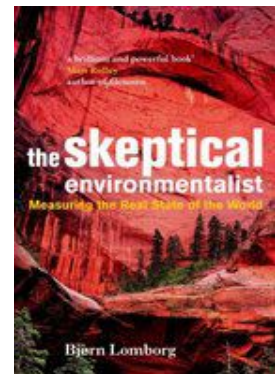
Ik heb onlangs twee boeken gelezen, één van een natuurkundige en één van een econoom. In *Out of Gas*, beschrijft de Caltech natuurkundige David Goodstein een dreigende energiecrisis, veroorzaakt door *The End of the Age of Oil*. Deze crisis komt er snel aan, voorspelt hij: de crisis zal toeslaan, niet wanneer de laatste druppel olie is gewonnen, maar wanneer de oliewinning niet meer aan de vraag kan voldoen - misschien al in 2015 of 2025. Bovendien, zelfs als we op magische wijze al onze energieverstinkende activiteiten meteen zouden overschakelen op kernenergie, zegt Goodstein, zou de oliecrisis binnen een jaar of twintig eenvoudigweg worden vervangen door een nucleaire crisis, omdat ook de uraniumreserves uitgeput zouden raken.



David Goodstein 2004

In *The Skeptical Environmentalist*, schetst Bjørn Lomborg een volledig ander beeld. "Alles gaat goed." Sterker nog, "alles wordt beter."

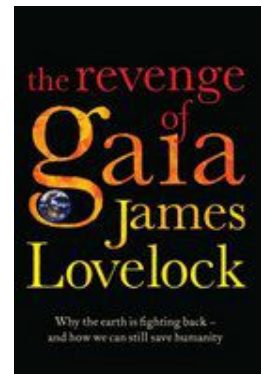
Bovendien, "we stevenen niet af op een grote energiecrisis," en "er is genoeg energie."



Bjørn Lomborg 2001

Hoe kunnen twee slimme mensen tot zulke verschillende conclusies komen? Ik wilde dit tot op de bodem uitzoeken.

Energie kwam in 2006 in het Britse nieuws. Aangewakkerd door het nieuws van grote klimaatverandering en een verdriedouging van de prijs van aardgas in slechts zes jaren en het woeden van een vlammend debat. Hoe moet Groot-Brittannië omgaan met zijn energiebehoeften? En hoe moet de wereld dat doen?



James Lovelock 2006

"Wind of kernenergie?", bijvoorbeeld. Een grotere polarisatie van meningen onder slimme mensen is moeilijk voor te stellen. Tijdens een discussie over de voorgestelde uitbreiding van kernenergie, zei Michael Meacher, voormalig minister van milieu, "Als we de broeikasgassen met 60% willen verminderen ... tegen 2050 is er geen andere manier om dat te doen dan door hernieuwbare energiebronnen. Sir Bernard Ingham, voormalig ambtenaar, die voorstander was van nucleaire uitbreiding, zei "iedereen die op hernieuwbare energiebronnen vertrouwt om de [energie]-kloof te dichten, leeft in een absolute droomwereld en is, naar mijn mening, een vijand van het volk."

Vergelijkbare onenigheid is te horen binnen de ecologische beweging.

Iedereen is het erover eens dat er dringend *iets* moet gebeuren, maar *wat*? Jonathan Porritt, voorzitter van de Commissie voor Duurzame Ontwikkeling, schrijft: "Er is geen rechtvaardiging om op dit moment met plannen voor een nieuw kernenergieprogramma te komen, en ... een dergelijk voorstel zou onverenigbaar zijn met [de regerings] strategie voor duurzame ontwikkeling;" en "een niet-nucleaire strategie zou kunnen en moeten volstaan om alle CO₂-besparingen te realiseren die we tot 2050 en daarna nodig zullen hebben, en om te zorgen voor een zekere toegang tot betrouwbare energiebronnen." De milieudeskundige James Lovelock daarentegen in zijn boek *The Revenge of Gaia*: "Het is nu veel te laat om duurzame ontwikkeling tot stand te brengen." Naar zijn mening is energie uit kernsplitsing, hoewel deze niet wordt aanbevolen als het wondermiddel op lange termijn voor onze zieke [003] planeet, is "het enige doeltreffende medicijn dat we nu hebben." Windturbines op land zijn "slechts ... een gebaar om de milieu geloofsbrieven van [onze leiders] te bewijzen."

Dit verhitte debat gaat in wezen over cijfers. Hoeveel energie kan elke bron leveren, tegen welke economische en sociale kosten, en met welke risico's? Maar werkelijke cijfers worden zelden genoemd. In openbare debatten wordt alleen gezegd: "Kernenergie is een geldput" of "We hebben een *enorme* hoeveelheid golf- en windenergie". Het probleem met dit soort taal is dat het niet voldoende is te weten dat iets enorm is: we moeten weten hoe het ene "enorm" zich verhoudt tot het andere "enorm", namelijk ons *enorme* energieverbruik.

Om deze vergelijking te maken, hebben we getallen nodig, geen bijvoeglijke naamwoorden.

Waar getallen worden gebruikt, wordt hun betekenis vaak vertroebeld door enormheid.

Getallen worden gekozen om indruk te maken, om punten te scoren in argumenten, in plaats van om te informeren. "Inwoners van Los Angeles rijden 142 miljoen mijl - de afstand van de aarde naar Mars - elke dag." "Elk jaar worden 27 miljoen acres

tropisch regenwoud vernietigd." "14 miljard pond afval wordt elk jaar in de zee gedumpt." "Britten gooien 2,6 miljard sneetjes brood per jaar weg." "Het afvalpapier dat elk jaar in het VK wordt begraven, kan 103.448 dubbeldekkerbussen vullen."

Als alle ineffectieve ideeën om de energiecrisis op te lossen achter elkaar werden gelegd, zouden ze tot de maan en terug reiken. . . . Ik dwaal af.

Het resultaat van dit gebrek aan zinvolle cijfers en feiten? We worden overspoeld met een stortvloed van idiote opsommingen. De BBC deelt advies uit over hoe we ons steentje kunnen bijdragen om de planeet te redden - bijvoorbeeld "schakel de oplader van uw mobiele telefoon uit als hij niet in gebruik is;" als iemand bezwaar maakt tegen het feit dat opladers voor mobiele telefoons niet onze grootste vorm van energieverbruik zijn, wordt de mantra "alle beetjes helpen" tevoorschijn gehaald. Alle beetjes helpen? Een realistischer mantra is:

als iedereen een beetje doet, bereiken we ook maar een beetje.

Bedrijven dragen ook bij aan de dagelijkse onzin door ons te vertellen hoe geweldig ze zijn, of hoe ze ons kunnen helpen "ons steentje bij te dragen". De website van BP, bijvoorbeeld, prijst de vermindering van kooldioxide (CO₂) die zij hopen te bereiken door de verf te veranderen die gebruikt wordt om de schepen van BP te schilderen. Trapt iemand hierin? Iedereen zal toch wel raden dat het niet de verf is die aan de buitenkant wordt gebruikt, maar dat het de binnenkant van de tanker is die aandacht verdient, als we de CO₂-uitstoot van de maatschappij aanzienlijk willen verminderen? BP heeft ook een web-gebaseerde koolstof-absolutiedienst opgezet, "targetneutral.com", die beweert dat zij al uw koolstofuitstoot kunnen "neutraliseren", en dat het "niets kost" - sterker nog, dat uw CO₂-vervuiling kan worden opgeruimd voor slechts 40 pond per jaar.

Hoe kan dit kloppen? - Als de werkelijke kosten van het oplossen van de klimaatverandering 40 pond per persoon zouden bedragen, zou de regering het kunnen oplossen met het wisselgeld dat de minister van Financiën in zijn zak heeft!

Nog erger zijn bedrijven die het huidige milieubewustzijn uitbuiten door "hydro-elektrische batterijen", "biologisch afbreekbare mobiele telefoons", "draagbare windturbines om in te pluggen" en andere onzinnige dingen aan te bieden.

Campagnes zijn ook vaak misleidend. Mensen die voorstander zijn van hernieuwbare energie in plaats van kernenergie zeggen dat "offshore windmolenparken alle huizen in Engeland van stroom kunnen voorzien", en vervolgens zeggen ze dat "nieuwe kernenergie [004] - weinig zal doen aan de klimaatverandering" omdat "nieuwe kernenergie de uitstoot met slechts 4% zal verminderen". Dit argument is

misleidend omdat het speelveld halverwege is verschoven, van "aantal bediende woningen" naar "CO₂-reductie". De waarheid is dat de hoeveelheid elektriciteit die wordt opgewekt door de prachtige windturbines die "alle huishoudens van Engeland kunnen voorzien", even groot is als de productie van 10 kerncentrales. "Alle huizen in Engeland van elektriciteit voorzien" draagt dus bij tot 4% van de CO₂-uitstoot van Engeland.

Maar misschien zijn de ergste bedenkers van onzin wel de mensen die eigenlijk beter zouden moeten weten - de media en uitgevers die de onzin verspreiden - bijvoorbeeld "New Scientist" met het artikel over de "door water aangedreven auto"*³

In een klimaat waarin mensen de cijfers niet begrijpen, kunnen kranten, campagnes, bedrijven en politici met alles weggomen. Wij hebben eenvoudige cijfers nodig, en die moeten zinvol, vergelijkbaar en gedenkwaardig zijn.



Fig.1.1: Een Greenpeace flyer die ik vond in mijn junk mail in 2006. Kunnen de geliefde windmolens de gehate koeltorens vervangen?

Als we de cijfers bij de hand hebben, kunnen we ook vragen beantwoorden als deze:

1. Kan een land als Engeland theoretisch leven van zijn eigen hernieuwbare energiebronnen?
2. Als iedereen zijn thermostaat één graad dichters bij de buitentemperatuur zou zetten, in een kleinere auto zou rijden en de opladers van mobiele telefoons zou uitschakelen wanneer ze niet worden gebruikt, zou de energiecrisis dan kunnen worden afgewend?
3. Moet de belasting op brandstof aanzienlijk worden verhoogd? Moet de toegestane maximumsnelheid op alle wegen gehalveerd worden?
4. Is iedereen die voor windenergie is in plaats van kernenergie een vijand van het volk?
5. Als klimaatverandering "een grotere bedreiging dan terrorisme" is, moet de regering dan de "verheerlijking van reizen" strafbaar stellen en de "verheerlijking van consumptie" wettelijk verbieden?
6. Kunnen we de CO₂-vervuiling stoppen door over te schakelen op "geavan-

³)*(zie ook de noten aan het eind van het hoofdstuk voor de vreselijke details. Elk hoofdstuk heeft eindnoten met bronnen en aantekeningen. Om de lezer niet af te leiden, heb ik deze aantekeningen niet als voetnoten in de tekst willen plaatsen).

ceerde technologieën" zonder onze levensstijl te veranderen?

7. Moeten mensen worden aangemoedigd om meer vegetarisch te eten?
8. Is de bevolking van de aarde met een factor 6 te groot?

[005] Waarom hebben we het over energiebeleid?

Drie verschillende beweegredenen liggen aan de basis van de huidige energiediscussie: Ten eerste zijn fossiele brandstoffen een eindige hulpbron. Het is heel goed mogelijk dat de goedkope olie (voor onze auto's en vrachtwagens) en het goedkope gas (voor de verwarming van gebouwen) binnen een generatie opraken. Daarom zijn we op zoek naar alternatieve energiebronnen. Aangezien fossiele brandstoffen een waardevolle hulpbron zijn die kan worden gebruikt om kunststoffen en vele andere creatieve dingen te maken, zouden we ze misschien moeten bewaren voor een beter gebruik in plaats van ze alleen maar in brand te steken.

Ten tweede hebben wij belang bij energiezekerheid. Zelfs als fossiele brandstoffen ergens in de wereld beschikbaar blijven, willen wij er misschien niet afhankelijk van zijn, omdat dat onze economie kwetsbaar maakt en ons afhankelijk maakt van de grillen van onbetrouwbare vreemden. (Ik hoop dat je de tong in mijn wang kunt horen!).

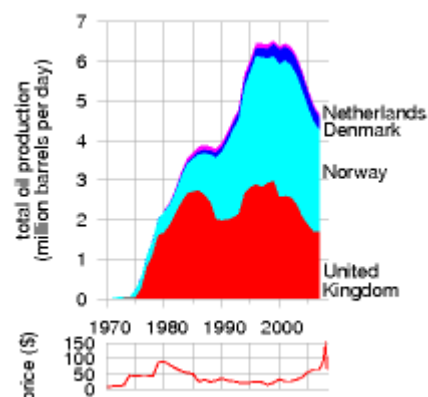


Fig.1.2: *Raken de fossiele brandstoffen op? De productie van ruwe olie in de Noordzee en de olieprijs in dollars per vat.*

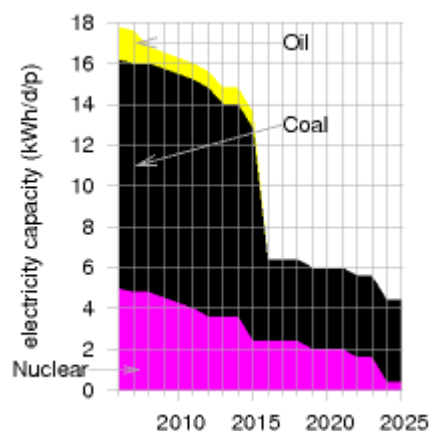


Fig.1.3: *De energiekloof als gevolg van de sluiting van elektriciteitscentrales in het kader van de plannen van het energiebedrijf EdF. De grafiek toont kerncentrales, kolencentrales en oliecentrales, in kWh per persoon per dag. Capaciteit" verwijst naar het maximaal toegevoerd vermogen van een bron.*

Zoals te zien is in **Fig.1.2**, lijkt het erop dat "onze" fossiele brandstoffen hun hoogtepunt al hebben bereikt. Voor Engeland ontstaat een speciaal probleem in verband met de continuïteit van de voorziening, dat bekend staat als de "Energy Gap": een aanzienlijk deel van de oude kolengestookte centrales en kerncentrales zal in de komende tien jaar buiten bedrijf worden gesteld (**Fig.1.3**), zodat het gevaar bestaat dat de vraag naar elektriciteit de elektriciteitsproductie gedeeltelijk zal overtreffen indien geen adequate tegenmaatregelen worden genomen.

Ten derde is het zeer waarschijnlijk dat het gebruik van fossiele brandstoffen het klimaat verandert. Klimaatverandering wordt toegeschreven aan verschillende menselijke activiteiten, maar in de eerste plaats aan het versterkte broeikaseffect als gevolg van CO₂-uitstoot. De belangrijkste bron van CO₂-uitstoot is de verbranding van fossiele brandstoffen. En de belangrijkste reden om fossiele brandstoffen te verbranden is voor energieproductie. Dus om de klimaatverandering aan te pakken, moeten we een nieuwe manier vinden om energie te produceren. [006] Het klimaatprobleem is dus grotendeels een energieprobleem.

Welke van deze drie punten ons ook motiveert, we hebben cijfers nodig over het energievraagstuk en een beleid dat deze cijfers kan optellen.

Bij de eerste twee punten gaat het om een rechtlijnige en door en door egoïstische motivatie om het gebruik van fossiele brandstoffen drastisch te verminderen. Het derde punt, klimaatverandering, is een meer altruïstische motivatie - de gevolgen van klimaatverandering zullen ons niet treffen, maar zullen toekomstige generaties nog vele honderden jaren treffen. Sommigen vinden misschien dat klimaatverandering niet hun verantwoordelijkheid is en argumenteren: "Wat voor verschil kan ik maken met mijn acties? China is buiten ieders controle!" Ik wil hier dus wat uitgebreider op de klimaatverandering ingaan, omdat ik tijdens het werken aan dit boek een aantal interessante feiten tegenkwam die ook licht werpen op deze ethische vraagstukken. De voorzichtige lezer die geen belangstelling heeft voor klimaatverandering kan het volgende gedeelte misschien beter overslaan.

De kwestie van de klimaatverandering

Als men de noodzaak van een duurzaam energiebeleid wil motiveren via klimaatverandering, redeneert men gewoonlijk in drie stappen: ten eerste veroorzaakt de mens een stijging van de CO₂-concentratie door de verbranding van fossiele brandstoffen; ten tweede is CO₂ een broeikasgas; ten derde resulteert de stijging van het broeikaseffect in een stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde (en enkele andere effecten).

Laten we beginnen met het feit dat de CO₂-concentraties in lucht en water toenemen. **Fig.1.4.** toont metingen van CO₂ concentraties in de lucht vanaf het jaar 1000

tot heden. Sommige "sceptici" hebben gesuggereerd dat de huidige stijging van de CO₂-concentratie een natuurlijk verschijnsel is. Betekent "scepticus" hier "iemand die niet naar de gegevens heeft gekeken"? Denk je niet dat er iets gebeurd kan zijn tussen 1800 en 2000? Iets dat geen deel uitmaakte van het natuurlijke proces dat aan het werk was in de 1000 jaar daarvoor?

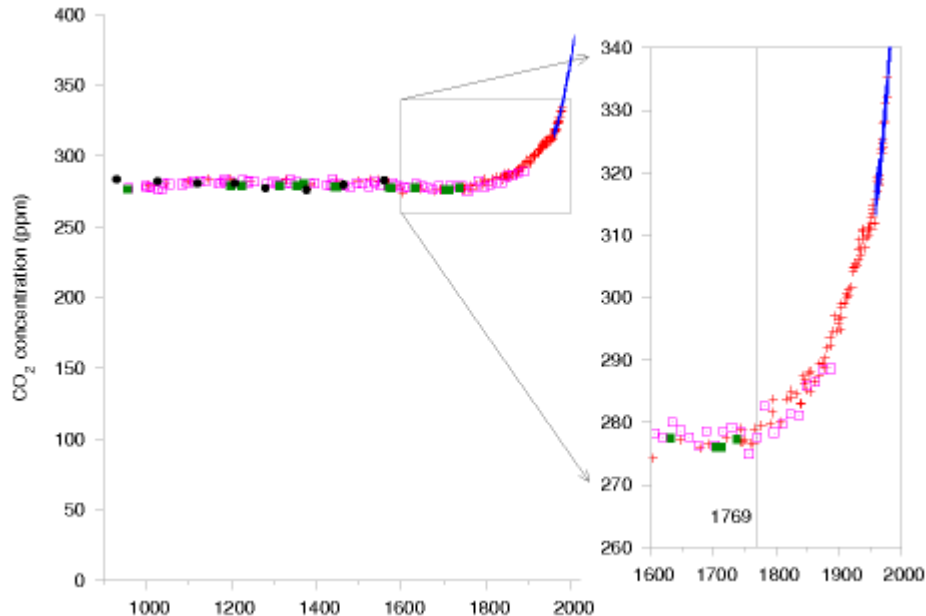
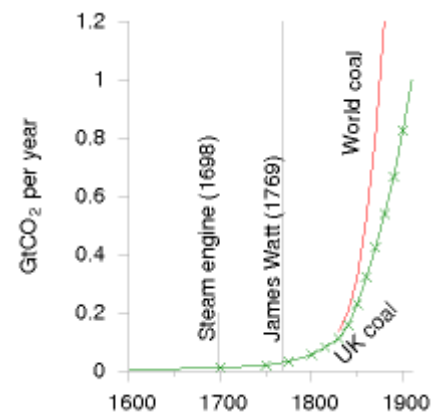


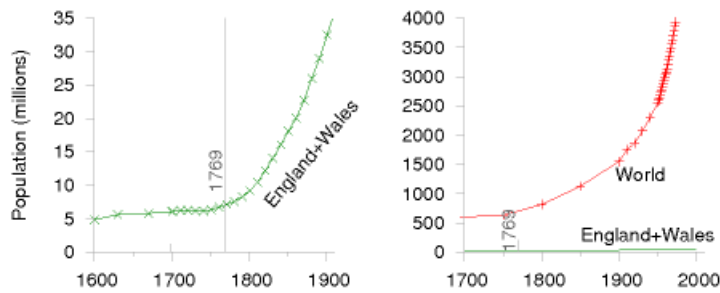
Fig.1.4: Koolstofdioxide (CO₂) concentraties (in ppm) over de laatste 1100 jaar, gemeten uit lucht gevangen in gletsjer kernen (waarden tot 1977) en uit directe metingen in Hawaii (waarden vanaf 1958).

Fig.1.5 (rechts) De geschiedenis van de steenkoolproductie in het VK en de rest van de wereld van 1600 tot 1910. De productiecijfers zijn weergegeven in miljarden tonnen CO₂ - een onbegrijpelijke eenheid, toegegeven, maar maak je geen zorgen, we zullen hem zo dadelijk personaliseren. Zie op volgende blz. nog enkele grafieken.



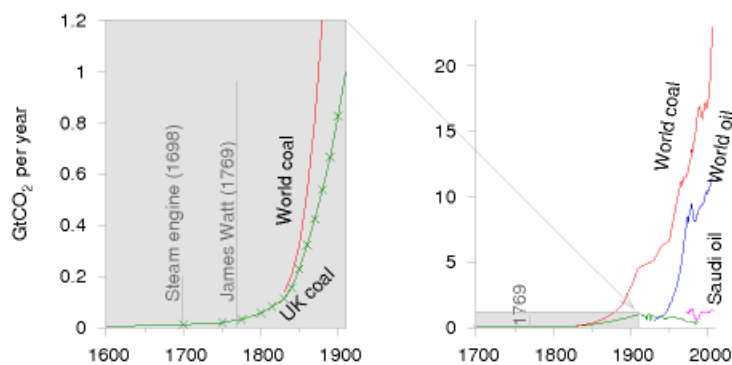
[007] In die tijd gebeurde er iets, en dat was de Industriële Revolutie.Q4⁴ Op de tekening is het jaar 1769 aangegeven, toen James Watt octrooi aanvraagde op zijn stoommachine. Hoewel de eerste werkende stoommachine al in 1698 was uitgevonden, was het Watt's veel efficiëntere machine die de industriële revolutie op gang bracht. Een van de belangrijkste toepassingen van de stoommachine was het pompen van water uit kolenmijnen. **Fig.1.5** toont de Britse steenkoolproductie vanaf 1769, en ik gebruik één miljard ton CO₂ als schaal eenheid voor elk ervan, [008], die vrijkomt bij de verbranding van deze steenkool.

4) Zie opmerking bij Duitse vertaling aan eind van dit hoofdstuk...



Twee extra Figuren met de groei van de bevolking in Engeland + Wales en die van de gehele Aarde resp 1600-1910 en 1700-2000

Tegen 1800 werd steenkool hoofdzakelijk gebruikt voor de ijzerproductie, voor de scheepvaart, voor de verwarming van gebouwen en de aandrijving van locomotieven en andere machines, en natuurlijk om de pompen aan te drijven waarmee steeds meer steenkool uit de heuvels van Engeland en Wales kon worden gedolven. Engeland was vreselijk gezegend met steenkool: toen de industriële revolutie begon, lag er onder Groot-Brittannië ongeveer evenveel steenkool opgeslagen als er olie onder Saudi-Arabië lag.



Nogmaals (links) Fig 1.5 en Fig 1.5b (rechts) met wat er gebeurde tusseb 1700 – 2000– zie ook Fig 1.6

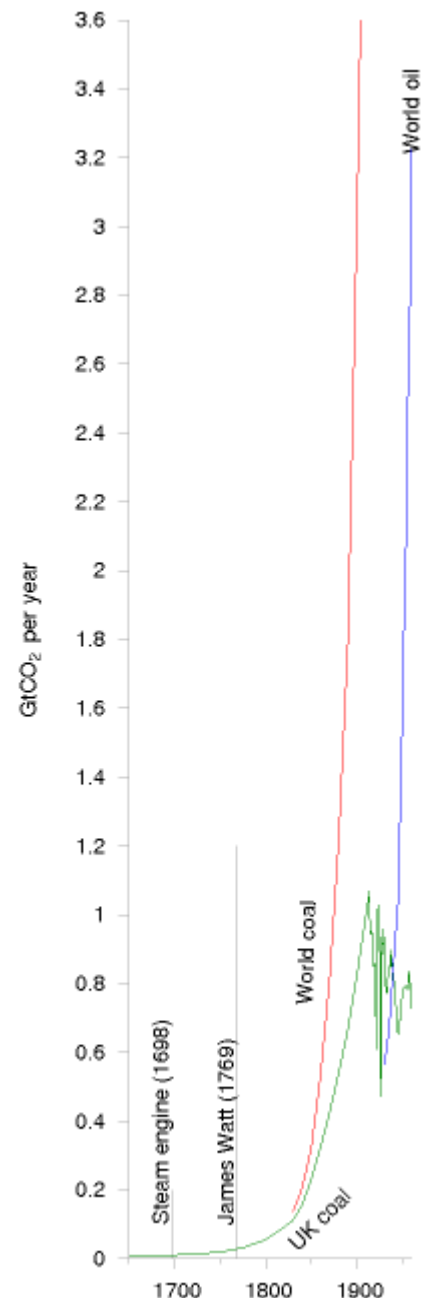


Fig.1.6: *De Engelse steenkoolproductie van 1650 tot 1960, in dezelfde eenheid als Fig.1.5*

In de 30 jaar van 1769 tot 1800 verdubbelde de Britse steenkoolproductie. Nog eens 30 jaar later (1830) was het weer verdubbeld. De volgende verdubbeling vond plaats binnen 20 jaar (1850), en nog een verdubbeling binnen nog eens 20 jaar (1870). Kolen stelden Engeland in staat de wereldbol roze te kleuren. De welvaart die het Engeland en Wales bracht, wordt weerspiegeld in een eeuw van ongekeende bevolkingsgroei.

Andere landen sprongen op de wagen, zodat de revolutie zich verspreidde. **Fig.1.6** toont de Britse en de wereldkolenproductie op dezelfde schaal als **Fig.1.5**, maar met het tijdvenster verschoven naar 50 jaar later. De Britse steenkoolproductie bereikte haar hoogtepunt in 1910, maar in de tussentijd verdubbelde de wereldproductie om de 20 jaar. Het is moeilijk om de geschiedenis van de steenkoolproductie in een grafiek uit te zetten. Om de volgende 50 jaar op dezelfde schaal weer te geven, zou het boek drie meter hoog moeten zijn. Om dit probleem op te lossen, kan men ofwel de verticale as herschalen: Of men kan de verticale as op een niet-lineaire manier samendrukken, zodat kleine en grote waarden tegelijk in één grafiek kunnen worden weergegeven. Een voorkeurstype van niet-lineaire compressie is de logaritmische schaal, die ik heb gebruikt in de onderste twee grafieken van **Fig.1.7** (blz. [009]). Op een logaritmische schaal wordt elke tienvoudige toename (van 1 tot 10, van 10 tot 100, van 100 tot 1000) weergegeven door dezelfde afstand.

[009] In een logaritmische schaal wordt een hoeveelheid met een constant jaarlijks stijgingspercentage (exponentiële groei genoemd) weergegeven als een rechte lijn. Logaritmische grafieken zijn geweldig om groei te begrijpen. Hoewel de lineaire grafieken in de bovenstaande figuren de boodschap overbrengen dat de steenkoolproductie in het VK en de wereld enorm is toegenomen, en dat de bevolking in het VK en de wereld eveneens enorm is gegroeid, kunnen zij de relatieve groeipercentages uiteraard niet weergeven. De logaritmische grafiek stelt ons daarentegen in staat de groeipercentages te vergelijken.

[010] Als men de hellingen van bijvoorbeeld de bevolkingscurven bekijkt, kan men zien dat de groei van de wereldbevolking in de laatste 50 jaar iets hoger ligt dan de groei van Engeland en Wales in de jaren 1800.

Tussen 1769 en 2006 is de jaarlijkse wereldproductie van steenkool 800 maal zo groot geworden. En het groeit nog steeds. Er worden ook andere fossiele brandstoffen geproduceerd - de middelste grafiek in **Fig.1.7** toont bijvoorbeeld de olieproductie - maar wat de CO₂-uitstoot betreft, staat steenkool nog steeds aan de top.

De verbranding van fossiele brandstoffen is de belangrijkste oorzaak van de stijging van de CO₂-concentratie. Dit is een feit, maar pas op: ik hoor een hardnekkig gemompel uit een menigte van klimaatveranderingsactivisten. Wat zeggen ze? Hier is Dominic Lawson, een columnist voor de Independent:

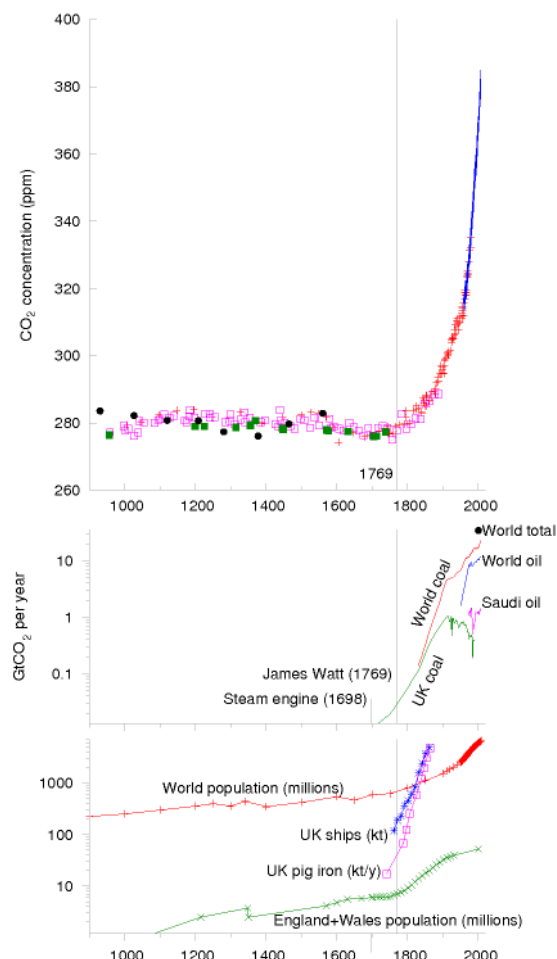
"Bij de verbranding van fossiele brandstoffen komt jaarlijks zo'n zeven gigaton CO₂ in de atmosfeer, wat nogal veel lijkt. Maar de biosfeer en de oceanen sturen elk jaar respectievelijk ongeveer 1.900 en 36.000 gigaton CO₂ de atmosfeer in - ... een van de redenen waarom sommigen van ons sceptisch zijn wanneer zoveel ophef wordt gemaakt over de bijdrage van

door de mens veroorzaakte verbranding aan het broeikaseffect. Het terugdringen van de industriële ("door de mens veroorzaakte") CO₂-uitstoot is megalomanie die het belang van de mens enorm overschat. Politici kunnen het weer niet veranderen.

Fig.1.7: De bovenste grafiek toont de CO₂ concentraties (in ppm) gedurende de laatste 1100 jaar, dezelfde gegevens als Fig.1.4.

De daar onderste grafiek toont op een logaritmische schaal enkele gevolgen van de industriële revolutie: Aanzienlijke bevolkingsgroei in Engeland en in de rest van de wereld, een opmerkelijke toename van de Engelse ruwruwproductie (in 1000 ton per jaar), en groei van de tonnages van Engelse schepen (in 1000 ton).

In tegenstelling tot de lineaire schalen van de vorige bladzijden, maakt de logaritmische weergave het mogelijk de wereldbevolking en de Engelse bevolking in een gemeenschappelijk diagram weer te geven en interessante parallellen te ontdekken.



"Nu, ik heb veel liefde voor scepticisme, en niet alles wat sceptici zeggen is onzin - en zelfs onverantwoordelijke journalistiek zoals die van Dominic Lawson verdient een goede weerlegging.

Het eerste probleem met het relaas van Lawson is dat alle drie de getallen die hij noemt (7, 1.900 en 36.000) fout zijn. De juiste getallen zijn 26, 440 en 330. Laten we ondanks deze fout terugkomen op het centrale punt van Lawson, de betrekkelijk geringe omvang van industriële ("door de mens veroorzaakte") emissies.

Ja, de natuurlijke CO₂-stromen zijn beslist groter dan wat wij hebben "toegevoegd" toen wij 200 jaar geleden serieus begonnen met de verbranding van fossiele brandstoffen. Maar het is misleidend om alleen de grote natuurlijke fluxen naar de atmosfeer te kwantificeren en de terugkerende fluxen naar de biosfeer en de oceanen, die

bijna even groot zijn, te verwaarlozen. Het punt is: deze natuurlijke fluxen in en uit de atmosfeer waren millennia lang bijna precies in evenwicht.

Je zou dus kunnen zeggen dat de natuurlijke stromen elkaar opheffen. Hoe groot ze ook waren, ze hebben de CO₂-concentratie in de atmosfeer en de oceaan de afgelopen duizend jaar constant gehouden. De verbranding van fossiele brandstoffen daarentegen creëert een extra stroming die, hoewel klein in absolute termen, wellicht niet wordt tenietgedaan door de natuurlijke CO₂-stromingen. Om met een eenvoudige analogie te werken: Stelt u zich de paspoortcontrole of de inklaring op een luchthaven voor. Elk uur komen er duizend passagiers aan, en er zijn net genoeg werknemers om die duizend passagiers te verwerken. Er is een wachtrij, maar omdat de aankomstfrequentie en de afhandelingsfrequentie met elkaar overeenstemmen, groeit deze wachtrij niet immens. Stelt u zich nu eens voor dat een extra stroom passagiers van een kleinere naburige luchthaven hierheen wordt omgeleid vanwege, zeg maar, mist. Deze stroom zou 50 extra passagiers per uur naar de aankomsthal brengen - een kleine toename vergeleken met de oorspronkelijke aankomstfrequentie van 1000 passagiers per uur. Althans in het begin zouden de douanemanagers het afhandelingspersoneel niet uitbreiden, en zouden zij precies 1000 passagiers per uur blijven afhandelen. Wat zou er gebeuren? De rij zou langzaam maar zeker groeien.

[011] De verbranding van fossiele brandstoffen verhoogt ontegensprekelijk de CO₂-concentratie in de atmosfeer en de oceanen. Geen enkele klimaatwetenschapper betwist dit feit. Wanneer de CO₂-concentraties in aanmerking worden genomen, is de menselijke factor aantoonbaar significant^{Q55}

Laten we aannemen dat de verbranding van fossiele brandstoffen de CO₂-concentraties aanzienlijk heeft doen toenemen. Maar stoort ons dat echt? "CO₂ en koolstof zijn natuurlijk!" herinnert de olielobby ons, "Koolstof is leven!" Als CO₂ geen problematische effecten heeft, dan zou de uitstoot van CO₂ inderdaad geen kwaad kunnen. Maar CO₂ is een broeikasgas. Niet de meest krachtige, maar niettemin een be-

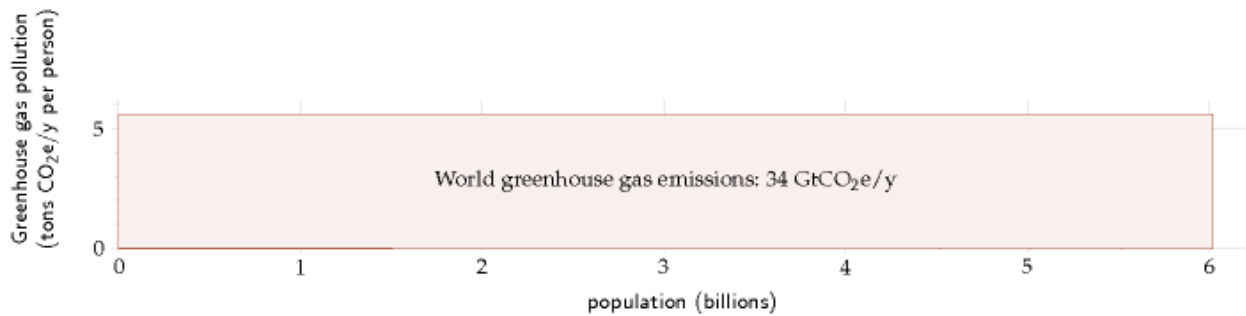
5) Q5 Wil er een significante verandering optreden, dan moet het natuurlijke evenwicht van de afgelopen duizend jaar, de totale natuurlijke stroom van CO₂ in en uit de atmosfeer, zo blijvend verstoord zijn door de naar verhouding geringe bijdrage van de mens, dat natuurlijke compensatie onwaarschijnlijk is. Of om in ons voorbeeld te blijven: Als slechts een deel van de check-in-bedienden zijn plaspauze zou inkorten of zijn werktempo met een paar procent zou opvoeren vanwege de extra drukte, zal de rij niet langer worden, of althans niet zo dramatisch als men bij oppervlakkige waarneming zou verwachten. Feit is dat de mechanismen en wetten die ten grondslag liggen aan de mondiale CO₂-cyclus nog te weinig bekend zijn om hier op dit moment gefundeerde uitspraken te kunnen doen over de mate waarin compensatie kan worden verwacht. Zie ook de opmerkingen aan het eind van het hoofdstuk, waar de compensatie op 40% wordt geschat. Dat compensatie optreedt lijkt vrij zeker, maar het kan a) bijna verwaarloosbaar zijn, of b) bijna de gehele extra CO₂-inbreng compenseren. Zelfs een overreactie van het systeem als reactie op een kleine verstoring is denkbaar. Bovenstaande uitspraak zou dus beter luiden: "is de menselijke factor wellicht van belang".

langrijke. Breng er meer van in de atmosfeer en het doet wat broeikasgassen doen: het absorbeert infrarode straling (warmtestraling) van de aarde en geeft die weer af in een willekeurige richting; het effect van deze willekeurige directionele verdeling is dat het de warmtestroom van de planeet naar de ruimte belemmert, als een dekbed. Dus CO₂ heeft een opwarmend effect. Dit feit is niet gebaseerd op historische gegevens over het wereldklimaat, maar op eenvoudige fysische eigenschappen van de CO₂-molecule. Broeikasgassen zijn een spreij, en CO₂ is een onderlaag ervan.

Als de mens erin zou slagen de CO₂-concentratie te verdubbelen of te verdrievoudigen (waar we op afstevenen als we zo doorgaan), wat zou er dan gebeuren? Er zijn een hoop onberekenbaarheden daar. Klimaatwetenschap is moeilijk. Het klimaat is een complex, zenuwachtig beestje, en het is onzeker hoeveel opwarming een verdubbeling van de CO₂-uitstoot zou veroorzaken. Toonaangevende klimaatmodellen lijken erop te wijzen dat een verdubbeling van de CO₂-uitstoot ongeveer hetzelfde effect zou hebben als een toename van de zonne-intensiteit met 2%, en de gemiddelde temperatuur op aarde met ongeveer 3°C zou kunnen doen stijgen. Dat zou iets zijn wat historici een "Slechte Daad" zouden noemen. Ik zal niet de hele litanie van mogelijke drastische gevolgen opnoemen, ik weet zeker dat je daar al genoeg van hebt gehoord. De litanie begint met "De ijskap van Groenland zal geleidelijk smelten en binnen een paar honderd jaar zal de zeespiegel met ongeveer 7 meter stijgen". De gevolgen van deze litanie zouden op de toekomstige generaties neerkomen. Dergelijke temperaturen hebben op zijn minst de laatste 100000 jaar niet meer op aarde bestaan, en het is waarschijnlijk dat het ecosysteem zo ingrijpend zou veranderen dat de aarde ons niet langer zou kunnen voorzien in een aantal dingen waarvan wij thans denken dat ze veilig zijn.

Klimaatmodellen zijn ingewikkeld en onderhevig aan grote onzekerheden. Onze kerheid over hoe het klimaat zal reageren op een toename van broeikasgassen is echter geen rechtvaardiging om niets te doen. Als je op een snelle motor door de mist bij een helling rijdt en je hebt geen goede kaart van het gebied, zou het ontbreken van een goede kaart dan een reden zijn om niet langzamer te rijden? **[012]** Dus, wie moet de motor afremmen? Wie moet de CO₂-uitstoot verminderen? Wie is verantwoordelijk voor de klimaatverandering? Dit is een ethische kwestie, geen wetenschappelijke, zeker, maar zelfs ethische discussies moeten op feiten gebaseerd zijn. Dus laten we de feiten over de uitstoot van broeikasgassen eens op een rijtje zetten. Eerst iets over de eenheden waarin ze gemeten worden. Broeikasgassen zijn onder meer CO₂, methaan en distikstofoxide (stikstofmonoxide); elk gas heeft andere fysische eigenschappen; het is gebruikelijk om alle gasemissies te rapporteren in CO₂-equivalenten, waarbij "equivalent" staat voor "hetzelfde opwarmende effect hebben over een periode van 100 jaar". Eén ton CO₂-equivalent wordt afgekort als 1 tCO₂e, en één miljard ton als 1 GtCO₂e (één gigaton). In 2000 be-

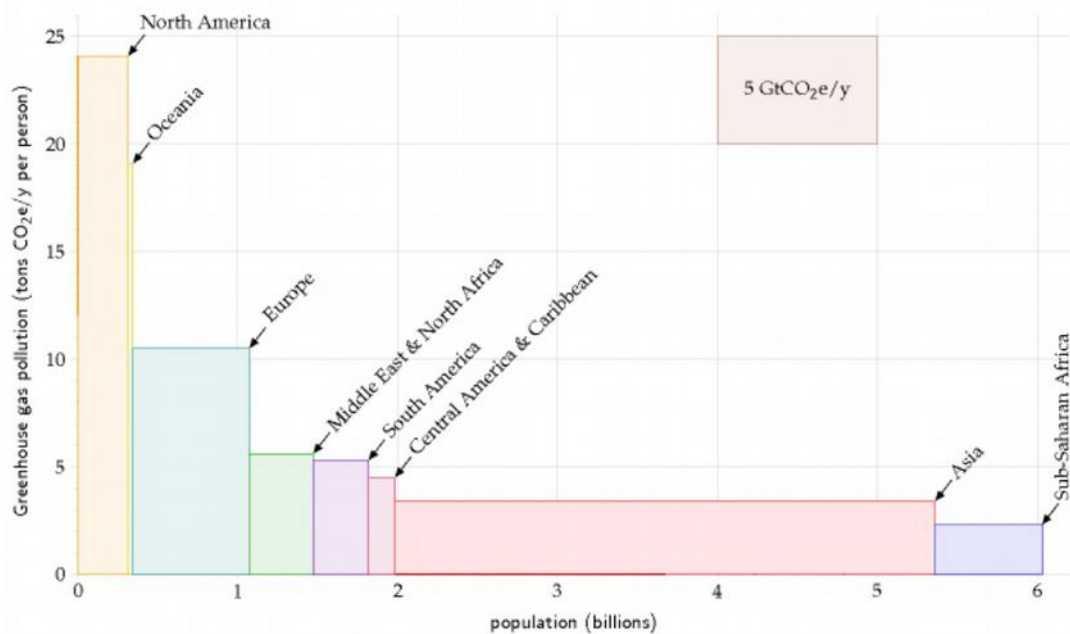
droeg de mondiale uitstoot Q6⁶ van broeikasgassen bijna 34 gigaton CO₂-equivalent per jaar ^{Q77}. Een onvoorstelbaar hoeveelheid. Maar we kunnen het vertalen in een meer tastbare en persoonlijke vorm door het te delen door het aantal mensen op de planeet, 6 miljard, om de broeikasgasvervuiling per persoon te krijgen, die ongeveer 5½ ton CO₂e per persoon per jaar bedraagt. Op die manier kunnen we de wereldwijde uitstoot weergeven in een rechthoek waarvan de breedte gelijk is aan de bevolking (6 miljard) en de hoogte aan de uitstoot per hoofd van de bevolking.



Nu, alle mensen zijn gelijk, maar niet iedereen stoot jaarlijks 5½ ton CO₂ uit. We kunnen de emissies van 2000 opdelen en zien hoe deze rechthoek van 34 gigaton over de verschillende regio's van de wereld is verdeeld – zie afbeelding op de volgende blz.

6)Q6 Hier, en ook in het volgende, wordt onder "emissie" altijd alleen de bijdrage verstaan - waarvan we weten dat die betrekkelijk gering is - die wordt veroorzaakt door industriële, d.w.z. menselijke, activiteiten.

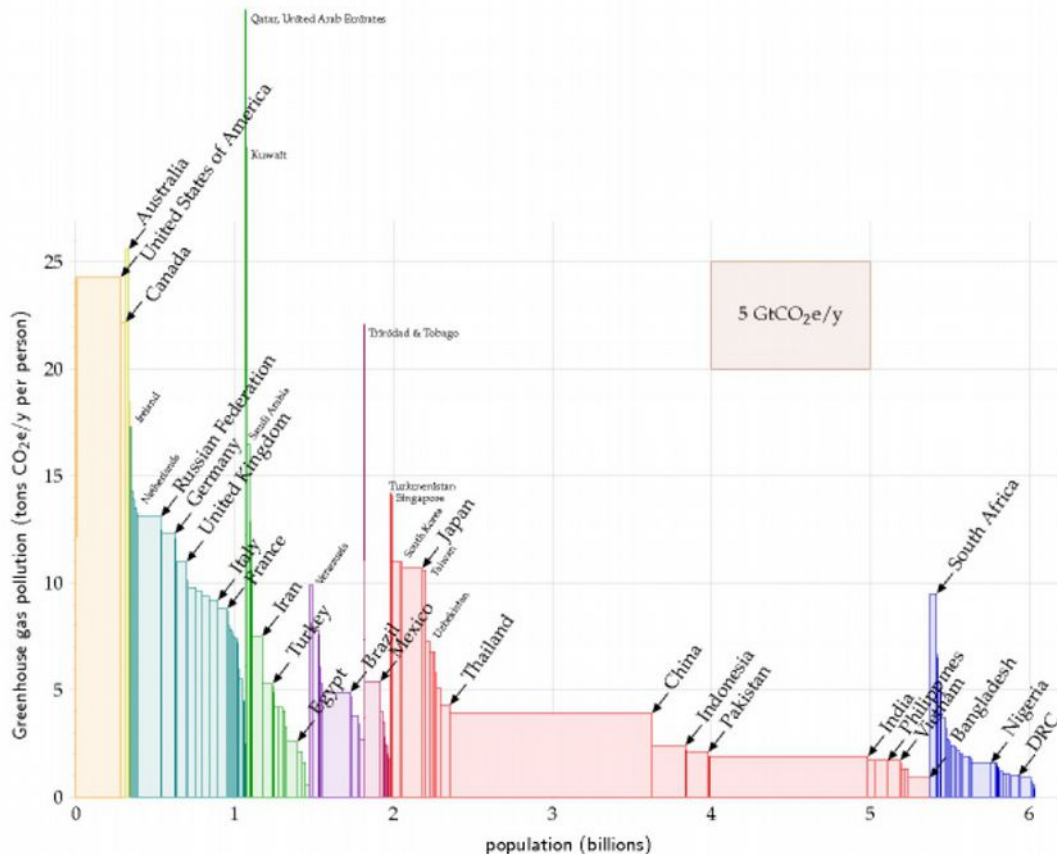
7)7 Naast de bovengenoemde 26 Gt CO₂ zijn er nog andere aandelen van de andere broeikasgassen.



[013] Deze afbeelding, op dezelfde schaal als de vorige, verdeelt de wereld in acht regio's. Elk rechthoekig gebied vertegenwoordigt de broeikasgasemissie van een regio. De breedte van de rechthoek vertegenwoordigt de bevolking van die regio, en de hoogte de uitstoot per hoofd van de bevolking in die regio.

In 2000 was de uitstoot per hoofd van de bevolking in Europa tweemaal zo hoog als het wereldgemiddelde, en in Noord-Amerika viermaal zo hoog als het wereldgemiddelde.

Wij kunnen de uitsplitsing verfijnen en de regio's verder opsplitsen in landen. Dat is waar het echt interessant wordt:



De belangrijkste landen met de hoogste uitstoot per hoofd van de bevolking zijn Australië, de VS en Canada. Europese landen, Japan en Zuid-Afrika blijven achter. Van de Europese landen zit Engeland in de middenmoot. Hoe zit het met China, het vermeende "onbeheersbare land"? Ja, de oppervlakte van de Chinese rechthoek is ongeveer even groot als die van de VS, maar de uitstoot per hoofd van de bevolking ligt onder het wereldgemiddelde. In India bedraagt de uitstoot per hoofd van de bevolking minder dan de helft van het wereldgemiddelde. Bovendien mag niet uit het oog worden verloren dat een aanzienlijk deel van de emissies in India en China ook verband houdt met de productie van goederen voor rijke landen.

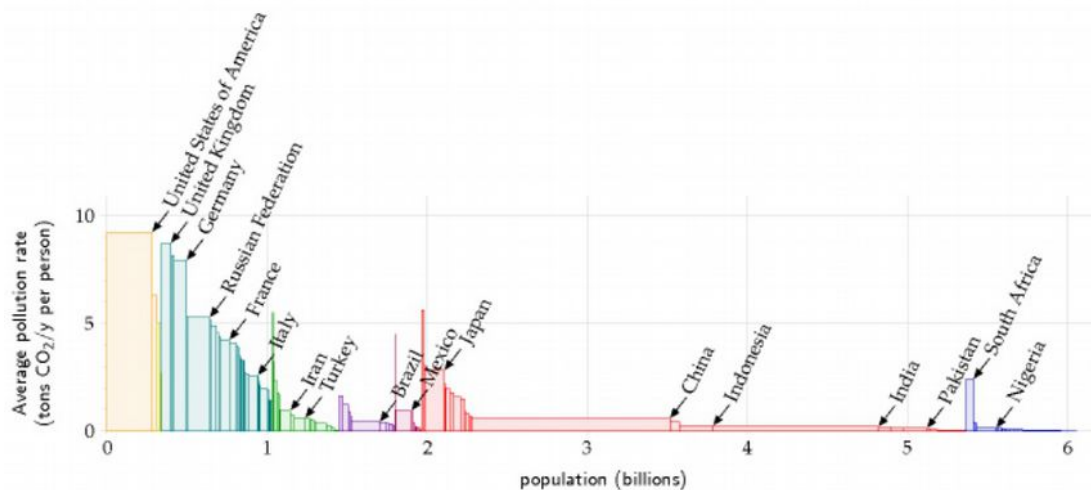
Ervan uitgaande dat "er iets moet worden gedaan" om de uitstoot van broeikasgasen te verminderen, wie heeft dan een speciale verantwoordelijkheid om iets te doen? Zoals ik al zei, dit is een ethische kwestie. Maar ik kan me moeilijk een ethisch systeem voorstellen dat niet tot de conclusie komt dat de verantwoordelijkheid vooral ligt bij de landen aan de linkerkant van de grafiek - landen waarvan de uitstoot twee, drie of vier keer zo hoog is als het wereldgemiddelde. Landen die het meest in staat zijn te betalen. Landen als Engeland en de VS, bijvoorbeeld.

[014] Historische verantwoordelijkheid voor de ineenstorting van het klimaat

Als we ervan uitgaan dat het klimaat door toedoen van de mens is vernietigd, en dat iemand dat moet herstellen, wie moet dat dan betalen? Velen denken: "De vervuiler moet betalen!" De afbeeldingen hierboven laten zien wie vandaag de vervuiling

veroorzaakt. Maar het is niet de snelheid van de CO₂-verontreiniging die van belang is, maar het cumulatieve effect van de totale uitstoot; een groot deel van de uitgestoten CO₂ (ongeveer een derde) zal nog minstens 50 of 100 jaar in de atmosfeer blijven hangen. Als wij de ethische stelling "de vervuiler betaalt" aanvaarden, dan moeten wij de historische voetafdruk van elk land bepalen.

De volgende figuur toont de cumulatieve CO₂-emissies voor elk land, uitgedrukt als een gemiddeld emissietempo over de periode van 1880 tot 2004.



Gefeliciteerd, Engeland! Groot-Brittannië heeft het podium van de winnaar gehaald. Engeland mag dan nu nog slechts deel uitmaken van het Europese middenveld, op de ranglijst van historische emittenten staat Engeland per hoofd van de bevolking op de tweede plaats, net achter de VS.

OK, genoeg over de ethiek. Wat is er volgens de wetenschap nodig om het risico van een opwarming van de aarde met 2 graden te vermijden (2 graden is de grens waarboven veel ernstige gevolgen worden voorspeld)? Er is hier een duidelijke consensus. We moeten onze achteloosheid ten aanzien van fossiele brandstoffen laten varen, en wel snel. Sommige landen, waaronder Engeland, hebben zich ertoe verbonden de uitstoot van broeikasgassen tegen 2050 met ten minste 60% te verminderen, hoewel moet worden benadrukt dat een vermindering met 60%, hoe radicaal ook, het tij waarschijnlijk niet zal doen keren. Als de wereldwijde uitstoot tegen 2050 geleidelijk met 60% wordt verminderd, is het volgens klimatologen meer dan waarschijnlijk dat de temperatuur wereldwijd met meer dan 2 graden zal stijgen. Het type vermindering waarnaar moet worden gestreefd, is weergegeven in **Fig.1.8**. Deze grafiek toont twee mogelijk veilige emissiescenario's die door Baer en Mastrandrea (2006) in een artikel van het Institute of Public Policy Research zijn gepresenteerd: De onderste curve is gebaseerd op de veronderstelling dat in 2007 een wereldwijde daling van de uitstoot met ongeveer 5% per jaar begint. De bovenste curve gaat uit van een korte vertraging in het begin van de daling, en van

een jaarlijkse daling van 4% wereldwijd. In beide scenario's wordt aangenomen dat er een kans is om een opwarming van meer dan 2 graden te voorkomen. In het laagste scenario wordt de kans dat de opwarming toch meer dan 2°C bedraagt, geraamd op [015] 9-26%, in het hoogste op 16-43%. Beide mogelijk veilige scenario's impliceren overigens aanzienlijk scherpere emissiereducties dan enig ander scenario dat door het IPCC of in de Stern Review (2007) wordt gepresenteerd.

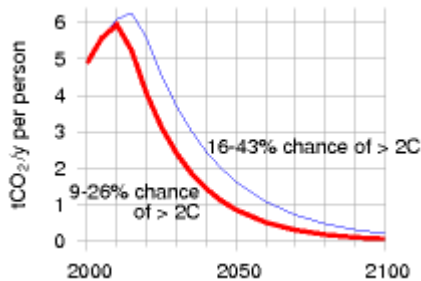


Fig.1.8: Wereldwijde emissies voor twee scenario's van Baer en Mastrandrea, uitgedrukt in ton CO₂ per persoon per jaar, uitgaande van een wereldbevolking van 6 miljard. Beide scenario's worden geacht een reële kans te bieden om een opwarming van meer dan 2°C boven het pre-industriële niveau te voorkomen.

Deze potentieel veilige trajecten vereisen dat de mondiale emissies tegen 2050 met respectievelijk 70% en 85% worden teruggedrongen. Wat zou dat betekenen voor een land als het VK? Als we het idee van "inkrimping en convergentie" onderschrijven, d.w.z. dat alle landen zich verbinden tot een gelijke uitstoot per hoofd van de bevolking, dan zal Engeland zijn uitstoot met meer dan 85% moeten verminderen: Het moet van de huidige 11 ton CO₂e per jaar naar 1 ton per jaar per persoon in 2050. Dit is zo drastisch dat we dit scenario het best kunnen beschouwen alsof er helemaal geen fossiele brandstoffen meer zouden zijn.

[016] Een laatste verklaring over de motivering van de klimaatverandering: hoewel een breed scala van menselijke activiteiten broeikasgassen veroorzaakt, blijft de energiesector verreweg de grootste bijdrage leveren. Sommige mensen rechtvaardigen hun passiviteit met smoesjes als "Het methaan van scheten latende koeien veroorzaakt meer opwarming dan luchtreizen". Het is waar dat bijproducten van de landbouw in 2000 goed waren voor ongeveer een achtste van de totale uitstoot van broeikasgassen. Maar de energiesector droeg voor driekwart bij. (Fig.1.9) Het klimaatprobleem blijft in wezen een energieprobleem.

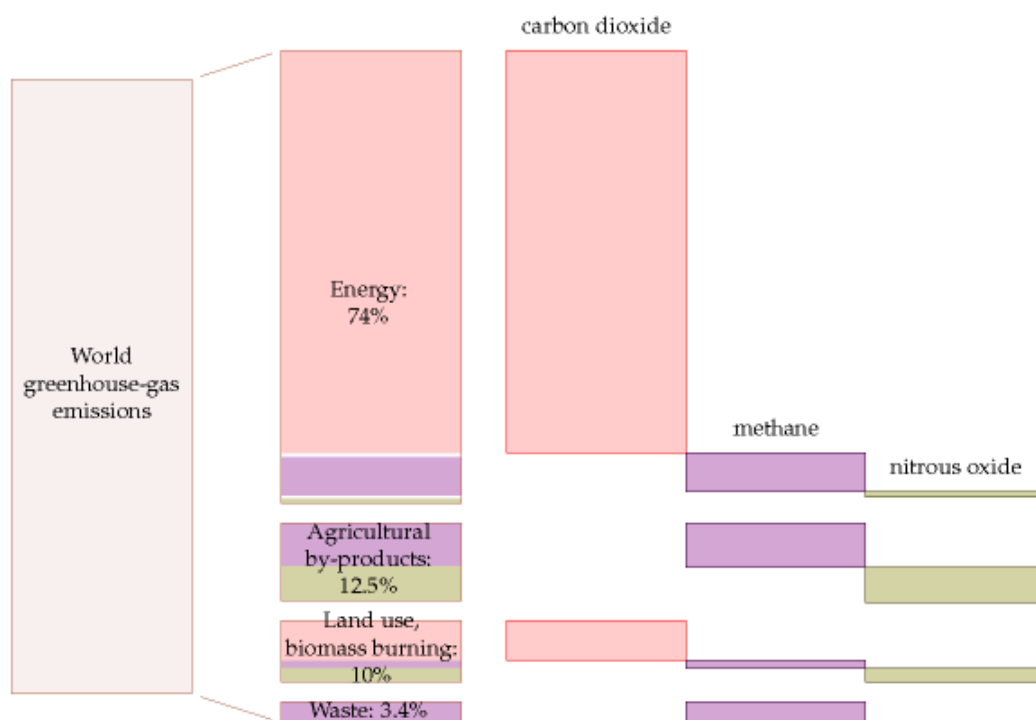


Fig.1.9: Verdeling van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen (2000) naar oorzaak en naar soort gas. De vervuiler "Energie" omvat elektriciteitscentrales, industriële processen, vervoer, verwerking van fossiele brandstoffen, verwarming en verbruik van energie in gebouwen. "Landgebruik ..." omvat veranderingen ten gevolge van landgebruik, ontbossing, verbranding van niet-hernieuwbare biomassa zoals turf, "Afval" omvat afvalbeheer. De hoeveelheden vertegenwoordigen het opwarmingspotentieel in een 100-jarig kader. Bron: Emission Database for Global Atmospheric Research.

Waarschuwingen voor de lezer

OK, genoeg over klimaatverandering. Ik ga ervan uit dat we voldoende gemotiveerd zijn om van de fossiele brandstoffen af te komen. Wat uw motivatie ook is, het doel van dit boek is u te helpen de juiste cijfers te berekenen en de nodige berekeningen te maken om een beleidsstrategie te ontwikkelen; het is een basispakket feiten te verschaffen dat u kunt gebruiken om te beoordelen welke voorstellen werkelijk op koers liggen. Ik beweer niet dat de getallen of berekeningen in dit boek nieuw zijn; de hierboven genoemde boeken van Goodstein, Lomborg en Lovelock staan bijvoorbeeld vol met interessante getallen en ruwe berekeningen, en er zijn veel interessante bronnen op het Internet (zie Referenties).

Wat ik in dit boek probeer te doen is deze getallen eenvoudig en gedenkwaardig te maken; u te laten zien hoe u zelf de relevante getallen kunt uitrekenen; en de situatie zo duidelijk voor te stellen dat iedere weldenkende lezer in staat zal zijn zijn eigen conclusies te trekken. Ik wil je niet mijn eigen conclusies opdringen. Overtuigingen zijn sterker wanneer zij uit jezelf komen dan wanneer zij onderwezen worden. Begrijpen is een creatief proces. Wanneer u dit boek hebt gelezen, hoop ik dat

uw vertrouwen zal worden versterkt om al het andere door uw eigen reflectie te weten te komen.

Ik wil benadrukken dat de berekeningen die wij zullen maken willekeurig onnauwkeurig zijn. Vereenvoudiging is de sleutel tot begrip. Eerst zullen we de getallen afronden om ze gemakkelijker te onthouden. Ten tweede, afgeronde getallen maken snelle berekeningen mogelijk. In het kader van dit boek, bijvoorbeeld, bedraagt de bevolking van Engeland 60 miljoen, en de wereldbevolking 6 miljard. Ik kan natuurlijk veel preciezere cijfers vinden, maar zo'n precisie zou de stroom van gedachten verstoren. Als we bijvoorbeeld te weten komen dat de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen in 2000 34 miljard ton CO₂-equivalent per jaar bedroeg, kunnen we zonder rekenmachine onmiddellijk afleiden dat de gemiddelde uitstoot per persoon 5 of 6 ton CO₂-equivalent (per persoon per jaar) bedroeg. Dit ruwe cijfer is niet exact, maar het is exact genoeg om een interessante discussie op gang te brengen. Als je dan weet dat een intercontinentale retourvlucht bijna twee ton CO₂ per passagier uitstoot, kun je met deze waarde (5-ton per persoon per jaar) schatten dat één zo'n vlucht per jaar gelijk staat aan meer dan een derde van de CO₂-uitstoot van de gemiddelde persoon.

Ik baseer mijn berekeningen liever op alledaagse kennis dan op onpersoonlijke landelijke statistieken. Als ik bijvoorbeeld de typische windsnelheid in Cambridge wil schatten, vraag ik "is mijn snelheid als fietser gewoonlijk sneller dan de wind?" en het antwoord is ja. Ik kan hieruit dus afleiden dat de windsnelheid in Cambridge zelden hoger ligt dan mijn gebruikelijke fietssnelheid van 20 km/u. Ik sta achter deze alledaagse schattingen met berekeningen van anderen en met officiële statistieken (zie de referenties). Dit boek is niet bedoeld als een referentiegid voor supernauwkeurige numerieke waarden. In plaats daarvan wil het illustreren hoe benaderingen kunnen worden gebruikt als onderdeel van een constructieve discussie die iedereen kan begrijpen. [017] In de berekeningen gebruik ik als referentiebasis voornamelijk Engeland, soms Europa, Amerika of de hele wereld, maar u zou de berekening gemakkelijk moeten kunnen herhalen voor elk land of elke regio van uw belangstelling.

Ik wil dit hoofdstuk afsluiten met nog een paar waarschuwingen aan de lezer. Niet alleen heb ik de slechte gewoonte om getallen te benaderen, ik verwaarloos ook allerlei details waar beleggers, managers en economen zich ernstig zorgen over moeten maken - 'arme mensen'! Wanneer je een hernieuwbare energiebron tracht op te zetten, maakt een slappe kostenstijging van 5% vaak het verschil tussen succes en mislukking, dus in de zakenwereld moet elk detail aandacht krijgen. Maar 5% is te weinig voor de radar van dit boek. Dit is een boek over ramingen, die misschien tot een factor 2 nauwkeurig zijn, soms slechts tot een factor 10. Het gaat over de fysieke grenzen aan duurzame energieproductie, niet over de huidige economische haal-

baarheid. De economie is altijd aan schommelingen onderhevig, maar de fundamentele beperkingen zullen nooit verdwijnen. We moeten deze beperkingen begrijpen.

Debatten over energiebeleid zijn vaak verwarrend en emotioneel omdat mensen feitelijke uitspraken verwarren met ethische uitspraken.

Voorbeelden van feitelijke beweringen zijn "bij de wereldwijde verbranding van fossiele brandstoffen wordt 34 miljard ton CO₂-equivalent per jaar uitgestoten" en "als het CO₂-niveau wordt verdubbeld, zal dit leiden tot een opwarming van 1,5° - 5,8° in de komende 100 jaar", "een temperatuurstijging van 2° zou het ijs van Groenland binnen 500 jaar doen smelten" en "het volledig smelten van het ijs van Groenland zou de zeespiegel met ongeveer 7 meter doen stijgen".

Een feitelijke bewering is of waar of onwaar; uitzoeken welke waar is, is vaak moeilijk, het is een wetenschappelijke vraag. De voorbeelden in de laatste alinea zijn of waar of onwaar. We weten niet of ze allemaal waar zijn. Sommige daarvan zijn momenteel geclassificeerd als "zeer waarschijnlijk". De moeilijkheid om uit te maken welke feitelijke beweringen waar zijn, leidt tot discussies in de wetenschap. Indien voldoende wetenschappelijke experimenten en discussies worden uitgevoerd, kan de waarheid of onwaarheid van de meeste feitelijke beweringen van geval tot geval worden achterhaald, althans "buiten redelijke twijfel".

Voorbeelden van ethische uitspraken zijn: "Het is verkeerd mondiale hulpbronnen te exploiteren op een manier die aanzienlijke kosten voor toekomstige generaties met zich meebrengt" en "Vervuiling mag niet gratis zijn", "We moeten stappen ondernemen om een verdere verdubbeling van de CO₂-concentraties onwaarschijnlijk te maken" en "Beleidsmakers moeten de CO₂-uitstoot aan banden leggen", "Landen met de hoogste CO₂-uitstoot - in de afgelopen honderd jaar - zijn verplicht het voortouw te nemen bij het nemen van maatregelen tegen klimaatverandering" en "Het is eerlijk CO₂-emissierechten gelijkmatig over de wereldbevolking te verdeelen".

Dergelijke beweringen zijn noch waar noch onwaar. Of wij het eens zijn met dergelijke uitspraken hangt af van ons ethisch oordeel; wij zijn vrij om dat te doen. Ethische verklaringen kunnen gedeeltelijk onverenigbaar zijn met andere; zo heeft de regering van Tony Blair een radicaal CO₂-beleid afgekondigd: "Engeland moet de CO₂-uitstoot tegen 2050 met 60% verminderen"; tegelijkertijd heeft Gordon Brown, kanselier in dezelfde regering, er herhaaldelijk bij de olieproducerende landen op aangedrongen hun productieniveau te verhogen.

[018] Beperk de opties die voor ons open staan op dit punt. Zoals elke goede we-

tenschapper zal ik proberen mijn opvattingen over ethische kwesties erbuiten te houden, en als er af en toe toch iets van doorkomt, vraag ik u om begrip.

Of het eerlijk is dat Europa en Amerika de energietaart opeten is een ethische vraag; het is mijn taak u eraan te herinneren dat u de taart niet kunt houden en opeten tegelijk; het is mijn taak u te helpen onzinnige en ondoeltreffende beleidsvoorstellen uit te roeien en weg te gooien; het is mijn taak u te helpen een energiebeleid te vinden dat past bij uw persoonlijke waarden.

We hebben een plan nodig dat alles samenbrengt, een plan dat werkt.

Opmerkingen en referenties

Hier aan het eind van het hoofdstuk verzamel ik aanvullende details van ideeën uit de tekst, bronnotities bij gegevens en citaten, en verwijzingen voor verder lezen.

Pagina	
[002]	"... er is geen weg rond hernieuwbare energiebronnen" "Iedereen die vertrouwt op hernieuwbare energiebronnen om de energiekloof te dichten, leeft in een aparte droomwereld en is in mijn ogen een vijand van het volk." Citaten komen uit Any Questions?, 27 jan 2006, BBC Radio 4 [ydoobr]. Michael Meacher was van 1997 tot 2003 minister van Milieu van het Verenigd Koninkrijk. Sir Bernhard Ingham was adviseur van premier Margaret Thatcher en voorzitter van de Government Information Service. Hij is secretaris van Supporters of Nuclear Energy.
2	Jonathon Porritt (maart 2006). Is kernenergie het antwoord? Afdeling 3. Advies aan de ministers. www-sd-commission.org.uk
3	"Kernenergie is een geldput" of "We hebben een enorme hoeveelheid golfslag en wind" . Ann Leslie, journaliste, in een verslag over Any Questions?, Radio 4, 10 februari 2006.
3	"Inwoners van Los Angeles reizen dagelijks ... van de Aarde naar Mars" - (The Earthworks Group, 1989, blz. 34).
3	targetneutral.com rekent £4 per ton CO ₂ om het te neutraliseren. (Een beduidend kleiner aantal dan enig ander "absolutie"-bedrijf dat ik ken). Tegen die prijs zou de gemiddelde Brit jaarlijks 11 ton kunnen neutraliseren door 44 pond te betalen! Een aanwijzing dat de neutralisatie door BP niet werkt, is het feit dat het project niet is gecertificeerd volgens de Gold Standard www-cdmgoldstandard.org (Michael Schlup, persoonlijke mededeling). Veel CO ₂ -teruggaveprojecten zijn door Fiona Harvey in de Financial Times [2jhve6] als waardeloos bestempeld. [019]
3	"Off-shore wind farms can power all of England's homes," Eind 2007 verklaarde de Britse regering dat zij de bouw van windturbines zou goedkeuren "enough to power all UK homes". Nick Rau van Friends of the Earth's campagne juichte deze verklaring toe. "De potentiële kracht die door deze industrie kan worden opgewekt, is duizelingwekkend", zei hij [25e59w]. "The Guardian [5o7mxk]: John Sauven, uitvoerend directeur van Greenpeace, zei dat de plannen een "revolutie in windenergie" zouden inluiden en dat Labour nu zijn voorkeur voor kernenergie moet laten varen, die "ooit in de verre toekomst de uitstoot slechts met ongeveer 4% zou kunnen verminderen". Nick Rau zei: "Wij zijn verheugd dat de regering serieus werk maakt van het potentieel van offshore-windenergie, die tegen 2020 25% van de elektriciteit in het VK zou kunnen opwekken." Enkele weken later kondigde de regering aan dat zij de bouw van nieuwe kerncentrales had goedgekeurd. "Het besluit van vandaag om het licht op groen te zetten voor een nieuwe generatie kerncentrales...zal weinig doen om de klimaatverandering aan te pakken," waarschuwt Friends of the Earth nu [5c4olc]. In feite waren beide geplande toevoegingen van capaciteit - wind en kernenergie - op hetzelfde totale jaarlijkse vermogen. De totale goedgekeurde offshore windcapaciteit van 33GW (piek) zou bijna 10GW per jaar hebben geproduceerd (4 kWh/d/p); en de vervanging van de oude reactoren zou 10GW per jaar hebben opgeleverd (4 kWh/d/p). In één adem verklaarden de tegenstanders van kernenergie dat de nucleaire optie "weinig bijdraagt", terwijl de windoptie "alle huishoudens kan voorzien". In feite zijn "alle huizen van energie voor-

	zien" en "de uitstoot met 4% verminderen" hetzelfde.
4	The "water-powered car" New Scientist, 29 juli 2006, blz. 35. Dit artikel, getiteld "Water-powered car might be available by 2009," opent: "Vergeet auto's die rijden op alcohol en plantaardige olie. Binnenkort kunt u uw auto misschien laten rijden met alleen maar water in de brandstoftank. Het zou het ultieme emissievrije voertuig zijn. Hoewel water op het eerste gezicht geen voor de hand liggende energiebron is, heeft het een belangrijke verdienste: het is een overvloedige bron van waterstof, het element dat alom wordt aangeprezen als de groene brandstof van de toekomst". Het project dat New Scientist beschreef was verre van belachelijk - het ging in feite over een auto die boor als brandstof gebruikt, met een boor/water-reactie als een van de eerste chemische stappen. Waarom alleen voelde de New Scientist zich genoodzaakt om dit te veranderen in de gewaagde catch-all "water is brandstof"? Water is geen brandstof. Dat is nooit zo geweest en zal ook nooit zo worden. Het is al opgebrand! De eerste wet van de thermodynamica zegt dat je geen energie uit het niets kunt creëren; je kunt alleen energie omzetten van de ene vorm in de andere. De energie in elke machine moet ergens vandaan komen. Fox News verkocht een nog absurder verhaal [2fztd3]. [020]
	4 Klimaatverandering "een grotere bedreiging dan terrorisme" - Klimaatverandering is een veel grotere bedreiging voor de wereld dan internationaal terrorisme. Sir David King, wetenschappelijk hoofdadviser van de Britse regering, januari 2004 [26e8z] - "Verheerlijking van reizen" - een verwijzing naar de aanval op "verheerlijking" in de Britse Terrorismewet, 13 april, 2006 [ykhayj].
5	Fig.1.2. toont de productie van ruwe aardolie inclusief leasecondensaat, aardgasinstallatievloeistoffen en andere vloeistoffen, en de raffinaderijverwerkingswinst. Bron: EIA, en BP statistisch overzicht van de wereldenergie.
7	de eerste werkende stoommachine. In feite beschreef Held van Alexandrië reeds een stoommachine, maar aangezien niemand die in de daaropvolgende 1600 jaar heeft gebouwd, beschouw ik Savery's uitvinding van 1698 als de eerste bruikbare stoommachine.
6	Fig.1.4 en Fig.1.7: Grafiek van de kooldioxideconcentratie. Gegevens samengesteld uit Keeling en Whorf (2005) (metingen voor 1958-2004); Neftel et al. (1994) (1734-1983); Etheridge et al. (1998) (1000-1978); Siegenthaler et al. (2005) (950-1888 AD); en Indermuhle et al. (1999) (van 11 000 tot 450 jaar voor heden). De grafiek moet niet worden verward met de "hockeystickgrafiek" van de Global-temperatuur. Het zal de oplettende lezer niet zijn ontgaan dat het aangevoerde argument inzake klimaatverandering niet uitgaat van historische temperaturen.
	Figuren 1.5-1.7: Steenkoolproductie, waarden uit Jevons (1866), Malanima (2006), Planbureau voor de Leefomgeving (2006), National Bureau of Economic Research (2001), Hatcher (1993), Flinn en Stoker (1984), Church et al. (1986), Supple (1987), Ashworth en Pegg (1986). Jevons was de eerste "peak oil" auteur. In 1865 schatte hij de gemakkelijk winbare steenkoolreserves van Engeland, besprak hij de geschiedenis van de exponentiële groei en voorspelde hij het einde van de exponentiële groei en het Britse leiderschap in de wereldeconomie: "Wij kunnen ons huidige groeitempo van het verbruik niet lang volhouden moet de rem op onze vooruitgang binnen een eeuw merkbaar worden. ...is de conclusie onvermijdelijk, dat onze huidige gelukkige progressieve toestand een zaak van beperkte duur is." Jevons had gelijk. Binnen een eeuw, piekte de Britse kolenproductie, en er waren twee wereldoorlogen

10	Dominic Lawson, Mijn citaat komt uit Dominic Lawson's column in de Independent, 8 juni, 2007 Het is geen woordelijk citaat. Ik heb de woorden ingekort, waarbij ik er goed op heb gelet geen fouten te corrigeren. Alle drie de cijfers die hij gebruikt zijn fout. In het bijzonder: Ten eerste zegt hij CO₂ maar geeft hij waarden voor koolstof: verbranding van fossiele brandstoffen blaast 26 gigaton CO₂ in de atmosfeer (niet 7 gigaton), een veelgemaakte fout. Ten tweede beweert hij dat de oceanen jaarlijks 36.000 gigaton koolstof in de atmosfeer brengen. Dit is een veel ernstiger fout: 36.000 gigaton is de totale hoeveelheid koolstof in de oceaan! [021] De jaarlijkse flux is veel kleiner: ongeveer 90 gigaton koolstof per jaar (330 Gt CO₂/j), volgens standaard diagrammen van de koolstofcyclus [l6y5g] (ik geloof dat deze 90 Gt C/j de theoretische flux is als je de atmosferische CO₂-concentratie op nul zet) Evenzo is zijn "1900 gigaton" flux van de biosfeer naar de atmosfeer onjuist. De correcte waarde volgens de standaardgrafieken is ongeveer 120 gigaton koolstof per jaar (440 Gt CO₂/j). Het toeval wil dat de waargenomen stijging van de CO₂-concentratie zich ongeveer op het niveau bevindt dat men zou verwachten als men ervan uitgaat dat de menselijke uitstoot van CO₂ in de atmosfeer blijft. Van 1715 tot 2004 is ongeveer 1160 Gt CO₂ in de atmosfeer terechtgekomen door de verbranding van fossiele brandstoffen en de cementproductie (Marland et al., 2007). Als al deze CO₂ in de atmosfeer zou blijven, zou er een stijging van 160 ppm (van 280 tot 440 ppm) te verwachten zijn. De huidige gemeten stijging bedraagt ongeveer 100 ppm (van 275 tot 377 ppm). Dus ongeveer 60% van wat werd uitgestoten is nu in de atmosfeer, 40% is afgebroken in de natuurlijke cyclus.
11	CO₂ heeft dus een opwarmend effect. Het over-geëmotioneerde debat hierover is een beetje vermoeiend, is het niet? "De wetenschap is gevestigd" "Nee, dat is het niet" "Ja, dat is het wel!" Voor degenen die dit heen en weer gepraat willen doorbreken, beveel ik een kort verslag aan van Charney et al. (1979). De bevindingen van dit rapport zijn belangrijk omdat de National Academy of Sciences (het Amerikaanse equivalent van de Royal Society) opdracht heeft gegeven tot het rapport en de auteurs heeft geselecteerd

	op basis van deskundigheid en "rekening houdend met een passend evenwicht". Het panel van deskundigen werd opgericht onder auspiciën van de Climate Research Board van de National Research Council om een wetenschappelijke basis te verschaffen voor prognoses van toekomstige klimaatveranderingen ten gevolge van menselijke emissies van CO₂ in de atmosfeer. Meer in het bijzonder werd hun gevraagd "de voornaamste uitgangspunten van ons huidige inzicht in dit vraagstuk vast te stellen", "de adequaatheid en onzekerheid van onze kennis van deze factoren en processen te kwantificeren" en "in duidelijke en objectieve bewoordingen ons beste huidige inzicht in het kooldioxide/klimaatprobleem samen te vatten, zodat het bruikbaar is voor beleidsmakers". Het verslag telt slechts 33 bladzijden, kan gratis worden gedownload [5qfkaw], en ik kan het ten zeerste aanbevelen. Het laat duidelijk zien welke delen van de wetenschap in 1979 vaststonden, en waar er nog onzekerheid heerste. Dit zijn de belangrijkste punten die ik uit dit verslag heb gehaald: Ten eerste zou een verdubbeling van de atmosferische CO₂-uitstoot de netto opwarming van de troposfeer, de oceanen en de landmassa's met een gemiddeld vermogen van 4 W/m² doen toenemen, indien alle andere atmosferische eigenschappen ongewijzigd blijven. Dit verwarmingseffect kan worden vergeleken met het gemiddelde vermogen dat door de atmosfeer, het land en de oceanen wordt geabsorbeerd, namelijk 238 W/m². Dus een verdubbeling van CO₂ is gelijk aan een toename van de zonne-intensiteit met $4/238 = 1,7\%$. Ten tweede zijn de gevolgen van deze door CO₂ veroorzaakte opwarming moeilijk te voorspellen vanwege de complexiteit van het atmosfeer-oceaansysteem, maar de auteurs suggereren een opwarming van het aardoppervlak tussen 2°C en 3,5°C, met een grotere toename op hogere breedtegraden. Aan het eind vatten de auteurs samen: "We hebben het geprobeerd, maar we zijn niet in staat om over het hoofd geziene of onderschatte fysische effecten te ontdekken die de momenteel geschatte opwarming van de aarde tot verwaarloosbare proporties zouden kunnen terugbrengen als de atmosferische CO₂ verdubbelt, of deze helemaal omkeren." Dankzij de oceanen, "het grote en gewichtige vliegwiel van het mondiale klimaatsysteem", zal de opwarming wellicht zo traag op gang komen dat zij de komende decennia moeilijk te detecteren zal zijn. Niettemin "zal uiteindelijk opwarming optreden en zouden regionale klimaatveranderingen wel eens aanzienlijk kunnen zijn". [022] Het voorwoord van de voorzitter van de Climate Research Board, Verner E. Suomi, vat de conclusies samen in een prachtige cascade van dubbele ontkenningen: "Als kooldioxide blijft stijgen, vindt de onderzoeksgroep geen reden om eraan te twijfelen dat dit tot klimaatverandering zal leiden en geen reden om aan te nemen dat deze te verwaarlozen zal zijn."
11	de hele litanie van mogelijke drastische gevolgen opnoemt, heeft u waarschijnlijk al veel van gehoord. Zo niet, cf. [2z2xg7] .
13	Figuren met de uitsplitsing van broeikasgasemissies per regio en land Gegevens uit: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) versie 4.0. Washington, DC:World Resources Institute, 2007). De eerste drie grafieken tonen de totalen voor het gehele land van de zes belangrijkste broeikasgassen (CO₂, CH₄, N₂O, PFK, HFK, SF₆), exclusief de bijdragen van landgebruik en bosbouw. De figuur op bladzijde 14 geeft alleen de cumulatieve uitstoot van CO₂ weer.
14	Gefeliciteerd, Engeland! Een welgemeend excuus op dit punt aan Luxemburg, waarvan de historische uitstoot per hoofd van de bevolking die van Amerika en Engeland overtreft, maar ik dacht dat het podium van de winnaar alleen open moest staan voor die landen die een grote uitstoot per hoofd van de bevolking hebben en tegelijkertijd een grote totale uitstoot. Wat de totale uitstoot betreft - historisch gezien - gaan de VS

	aan de leiding (322 Gt CO ₂), gevolgd (in deze volgorde) door Rusland (90 Gt CO ₂), China (89 Gt CO ₂), Duitsland (78 Gt CO ₂), Engeland (62 Gt CO ₂), Japan (43 Gt CO ₂), Frankrijk (30 Gt CO ₂), India (25 Gt CO ₂) en Canada (24 Gt CO ₂). De volgorde per hoofd van de bevolking is: Luxemburg, VS, Engeland, Tsjechische Republiek, België, Duitsland, Estland, Qatar en Canada.
14	heeft toegezegd de uitstoot van broeikasgassen tegen 2050 met ten minste 60% te verminderen. Tijdens het schrijven van dit boek werd de toezegging van Engeland verhoogd tot 80% vermindering ten opzichte van de niveaus van 1990.
15	Fig.1.8. in het lagere scenario bedraagt het risico van opwarming met meer dan 2°C naar schatting 9-26%; de cumulatieve koolstofemissies vanaf 2007 bedragen 309 GtC; de CO ₂ -concentraties bereiken een maximum van 410 ppm, de CO ₂ e-concentraties bedragen 421 ppm, en in 2100 zijn de CO ₂ -concentraties teruggevallen tot 355 ppm. In het hoogste scenario is het risico op een opwarming met meer dan 2°C 16-43%; de cumulatieve koolstofemissies vanaf 2007 bedragen 415 GtC; de CO ₂ -concentraties bereiken een maximum van 425 ppm, de CO ₂ e-concentraties 435 ppm, en in 2100 zijn de CO ₂ -concentraties teruggevallen tot 380 ppm. Zie ook hdr.undp.org/nl/reports/global/hdr2007-2008/ .
16	interessante informatiebronnen op internet: BP's Statistical Review of World Energy [yyxq2m], de commissie voor duurzame ontwikkeling www-sdcommission.org.uk , de Danish Wind Industry Association www-windpower.org , Environmentalists For Nuclear Energy www-ecolo.org , Wind Energy Department, Risø University www-ri-soe.dk/vea , DEFRA www-defra.gov.uk/environment/statistics , speziell das Buch Avoiding Dangerous Climate Change [dzcq], das Pembina Institute www-pembina.org/publications.asp , und das DTI (jetzt bekannt als BERR) www-dti.gov.uk/publications/ .
17	Feitelijke verklaringen vermengen met ethische verklaringen . . . Ethische uitspraken worden ook wel "normatieve uitspraken" of "waardeoordelen" genoemd, en feitelijke uitspraken worden ook wel "positieve uitspraken" genoemd. Ethische verklaringen bevatten gewoonlijk werkwoorden als "moeten" of "moeten" en bijvoeglijke naamwoorden als "juist", "juist" of "verkeerd". Dessler en Parson (2006) leveren nuttig materiaal. [023]
17	Gordon Brown. Op 10 september 2005 verklaarde Gordon Brown dat de hoge olieprijs een groot risico vormt voor de Europese economie en de mondiale groei en drong hij er bij de OPEC op aan de productie te verhogen. Zes maanden later zei hij "we hebben ... meer productie nodig, meer boren, meer investeren, meer petrochemische investeringen" (22 april 2006) [y98ys5]. Laat ik de kritiek op Gordon Brown relativiseren en een van zijn recentere activiteiten prijzen, namelijk de bevordering van elektrische auto's en hybriden. Zoals u later zult zien, is een van de implicaties van dit boek dat het elektrificeren van grote delen van het vervoer een goed plan is om van fossiele brandstoffen af te komen
	Opmerking Duitse vertaler Q4 <i>Het lijkt geen twijfel dat de industriële revolutie en de daarmee gepaard gaande toename van de CO₂-uitstoot in de tijd gecorreleerd zijn met het begin van de opwarming van de aarde. Dergelijke temporele correlatie is vaak een aanwijzing voor causale (oorzaak-en-gevolg) verbanden tussen gebeurtenissen, en uit heuristisch oogpunt is het volkomen zinvol naar causale verbanden te zoeken, vooral in temporeel gecorreleerde processen. Deze correlatie mag echter niet als bewijs worden gepresenteerd; zij houdt bepaalde risico's in. Als wij bijvoorbeeld het geboortecijfer in</i>

	<i>Duitsland in een chronologisch diagram over de laatste decennia uitzetten, zien wij een duidelijk dalende tendens. Als we kijken naar publicaties van biologen over vogelpopulaties, bijvoorbeeld de witte ooievaars die in Duitsland broeden, dan zien we een soortgelijke duidelijke achteruitgang in dezelfde periode. Het veronderstellen van een oorzakelijk verband hier, zou echter over het algemeen worden afgedaan als een fabeltje.</i>

2 balans.

De Balans

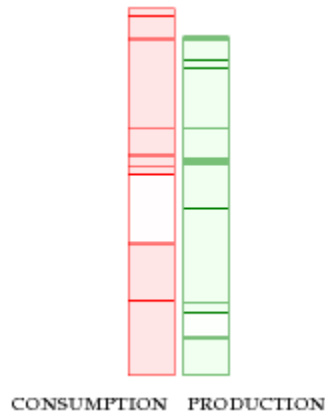
De natuur laat zich niet voor de gek houden.

Richard Feynman

Laten we het hebben over energieverbruik en energieproductie. Op dit moment wordt het grootste deel van de energie die in de geïndustrialiseerde wereld wordt verbruikt, geleverd door fossiele brandstoffen. Dat is niet houdbaar Q8⁸. Hoe lang we precies kunnen leven ten koste van fossiele brandstoffen is een interessante vraag, maar het is niet de vraag die we in dit boek willen onderzoeken. Ik denk liever na over leven zonder fossiele brandstoffen.

Om dat te doen, maken we twee stapels. Aan de linkerkant van de rode stapel tellen we al ons energieverbruik op, en aan de rechterkant van de groene stapel tellen we al onze duurzame energieproductie op. We bouwen beide stapels één voor één op en bespreken elke bijdrage afzonderlijk.

⁸)Q8 De term "duurzaam" wordt hier, evenals in het onderstaande, in zijn engere betekenis gebruikt als synoniem voor "eeuwigdurend" "onuitputtelijk" "handhaafbaar". Het vervangt de Engelse term "sustainable" die ook in de oorspronkelijke titel van het boek wordt gebruikt en die verwant is met het werkwoord "sustain" = volhouden. In de Engelstalige literatuur wordt "duurzame energie" vaak synoniem gebruikt met "regeneratieve energie", en in veel technische aspecten is er geen verschil, want regeneratieve energie is natuurlijk ook duurzaam in deze betekenis - voor altijd te handhaven, onuitputtelijk. Toch wordt hier en daar een verschil in betekenis of accent zichtbaar: in tegenstelling tot het regeneratieve concept gaat het bij duurzaamheid niet in de eerste plaats om een cyclus van denken, maar om een periode waarin "slijtage"-effecten merkbaar worden. Getijdenenergie (zie hoofdstuk 14) of geothermische energie (zie hoofdstuk 16), bijvoorbeeld, zijn fysisch niet regeneratief in engere zin, omdat de aan het systeem onttrokken energie er niet in terugvloeit; zij zijn niettemin duurzaam omdat de halveringstijd van de op deze wijze aangeboorde hulpbronnen (thermische energie van de aardkern, rotatie-energie van de aarde) enorm is in vergelijking met de planningshorizon (enkele honderden jaren). Fossiele brandstoffen zijn ook in zeer enge zin regeneratief (op tijdschalen van vele miljoenen jaren worden steeds weer nieuwe voorraden gevormd), maar als zij op duurzame wijze worden geëxploiteerd (d.w.z. alleen in het tempo van winning dat overeenkomt met de nieuwe vorming) leveren zij geen noemenswaardige bijdrage meer aan de energievoorziening. Vgl. ook de volgende definitie in Wikipedia [en.wikipedia.org]: "Het begrip duurzaamheid beschrijft het gebruik van een regenererbaar systeem op zodanige wijze dat dit systeem zijn essentiële eigenschappen behoudt en zijn bestand op natuurlijke wijze kan aangroeien."



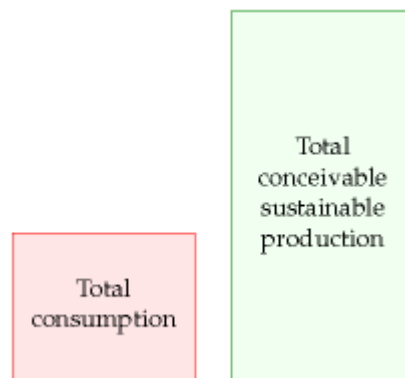
De vraag die in dit boek wordt onderzocht is: "Is het theoretisch denkbaar dat we duurzaam leven?" Aan de rechterkant tellen we dus alle denkbare duurzame energiebronnen, op de groene stapel. In de linker, rode stapel, schatten we de [025] consumptie van een "typische redelijk welgestelde persoon"; ik vraag u ook uw eigen totale consumptie te schatten en zo uw persoonlijke linkerstapel te genereren. Later zullen wij ook het huidige gemiddelde energieverbruik van een Europeaan en een Amerikaan te weten komen.

Enkele van de belangrijkste vormen van consumptie voor de linkerstapel zijn: • Vervoer • - auto's, vliegtuigen, vracht • Verwarming en koeling • Verlichting • Informatiesystemen en andere apparatuur • voedsel • Productie	In de juiste stapel van duurzame productie, zullen onze hoofdcategorieën zijn: • Wind • Zonne - Fotovoltaïsch, Thermisch, Biomassa • Waterkracht • Golven • Getijden • Geothermische energie • Kernenergie ? (met vraagteken, want het is niet duidelijk of kerncentrales als "duurzaam" kunnen worden beschouwd).

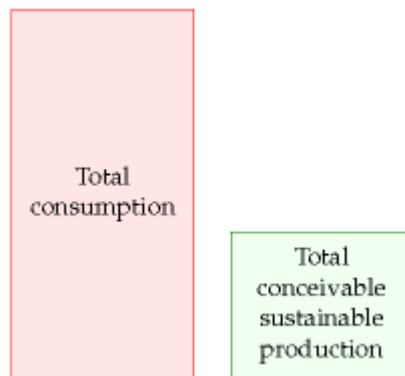
Door ons energiegebruik voor verwarming, vervoer, fabricage, enz. te bepalen, willen wij niet alleen een getal berekenen voor de linkerkant van onze balans, maar ook begrijpen waarvan elke waarde afhangt en hoe gevoelig ze zou zijn voor verandering.

In de rechtse, groene stapel tellen we de ramingen van de duurzame productie voor Engeland bij elkaar op. Dit stelt ons in staat de vraag te beantwoorden: "Kan Engeland theoretisch leven van zijn eigen hernieuwbare energiebronnen?"

Of de duurzame energiebronnen die wij op de rechterstapel leggen economisch haalbaar zijn, is een belangrijke vraag, maar die laten wij voorlopig buiten beschouwing. Laten we eerst de twee palen bouwen. Omdat mensen soms te veel op hebben met economische haalbaarheid en het grote geheel uit het oog verliezen. Mensen discussiëren bijvoorbeeld over "Is windenergie goedkoper dan kernenergie?" en vergeten te vragen "Hoeveel wind is er eigenlijk beschikbaar?" of "Hoeveel uranium is er nog over?". Het resultaat van onze optelling zou er zo uit kunnen zien:



[026] Als we ontdekken dat de consumptie veel minder is dan de theoretisch mogelijke duurzame productie, dan kunnen we zeggen: "Nou, misschien kunnen we duurzaam leven; laten we eens kijken naar de economische, sociale en milieukosten van deze duurzame alternatieven, en uitzoeken welke hoeveel onderzoek en ontwikkeling nodig hebben; als we dat goed doen, is er misschien geen energiecrisis." Aan de andere kant, zou onze uitkomst er zo uit kunnen zien:



- een veel somberder beeld. Deze foto zegt namelijk: "Wat de economische aspecten van duurzame energieproductie ook zijn, het is gewoon niet genoeg om onze huidige levensstijl in stand te houden, massale veranderingen zijn onvermijdelijk."

Vermogen en energie

De meeste discussies over energieverbruik en -productie zijn verwarrend, alleen al door de grote verscheidenheid aan eenheden waarin vermogen en energie worden

gemeten, van "ton aardolie-equivalent" tot "terawattuur" (TWh) en exajoule (EJ). Niemand behalve de specialisten heeft een idee van wat "een vat olie" of "een miljoen BTU's" in menselijke termen betekenen. In dit boek zullen we alles beschrijven in een uniforme set van persoonlijke eenheden die iedereen kan bedenken.

Fig.2.1: *Onderscheid tussen energie en vermogen: elk van deze lampen van 60 watt heeft een vermogen van 60 watt wanneer ze branden; ze hebben geen "energie" van 60 watt. Hij verbruikt 60 W elektrisch vermogen en zendt 60 W vermogen uit in de vorm van licht en warmte (voornamelijk warmte).*



Ik kies het kilowattuur (kWh) als meeteenheid voor energie. Deze hoeveelheid is "een eenheid" op de elektriciteitsrekening, en kost een residentiële consument ongeveer 10 cent (2008). Zoals we zullen zien, vergen de meeste dagelijkse dingen energiehoeveelheden van een paar kWh.

Wanneer we het hebben over vermogen (de snelheid van energiegebruik of -productie, een energiestroom zagezegd), is de maateenheid bij voorkeur het "kilowattuur per dag" (kWh/d). Af en toe gebruiken we ook de watt ($40\text{ W} \approx 1\text{ kWh/d}$) en de kilowatt ($1\text{ kW} = 1000\text{ W} = 24\text{ kWh/d}$), zoals ik hieronder zal uitleggen. Het kilowattuur per dag is een mooie eenheid die is afgestemd op alledaagse grootheden; de meeste energieverblindende activiteiten vreten in een tempo dat overeenkomt met een klein aantal kilowatturen per dag. Zo verbruikt een gloeilamp van 40 W, wanneer deze continu brandt, één kilowattuur per dag. $- 24 \times 40 = 960\text{ W} -$ [027] Sommige nutsbedrijven sturen bij hun rekeningen grafieken met het energieverbruik in kilowattuur per dag. Ik zal deze eenheid gebruiken voor alle vormen van energie, niet alleen elektriciteit. Olieverbruik, gasverbruik, kolenverbruik: ik zal al deze diensten / energiestromen meten in kWh/d. Laat me één ding duidelijk maken: Voor sommige mensen staat "stroom" uitsluitend voor elektrische energiestromen. Maar dit boek gaat over alle vormen van energieverbruik en -productie, en ik gebruik de term "energie" voor al die vormen.

Eén kilowattuur per dag is ongeveer de hoeveelheid energie die een menselijke slaaf kan produceren. Het aantal kWh per dag dat u verbruikt, is dus het effectieve aantal slaven dat u voor u laat werken.

In de omgangstaal gebruiken veel mensen de termen kracht en energie door elkaar, maar in dit boek houd ik me strikt aan de wetenschappelijke definities. Vermogen is de snelheid waarmee iemand of iets energie gebruikt of levert. Misschien is de beste manier om energie en kracht uit te leggen het gebruik van de analogie van water

en het stromen van water uit een kraan. Als u water wilt drinken, drink dan een bepaalde hoeveelheid - een liter misschien (als u erge dorst hebt). Draai de kraan open, zorg voor een waterstroom - bijvoorbeeld één liter per minuut als de kraan maar een beetje druppelt, of 10 liter per minuut voor een grotere kraan. U kunt hetzelfde volume (een liter) vullen als u de druppelende kraan gedurende een minuut openzet, of de grotere kraan gedurende een tiende van een minuut. Het geleverde volume in een bepaalde tijd is gelijk aan het debiet – hoeveelheid/tijd – vermenigvuldigd met de tijd:

$$\text{Volume} = \text{Debiet} \times \text{Tijd}.$$

We zeggen dan dat het debiet het tempo of de snelheid is waarmee het volume wordt geleverd. Als we het geleverde volume in een bepaalde tijd kennen, kunnen we het debiet berekenen door het volume door de tijd te delen:

$$\text{Debiet} = \text{Volume} / \text{Tijd}$$

En dat is het verband met kracht en energie: energie is als volume in water, kracht is gelijk aan stroming. Wanneer bijvoorbeeld een broodrooster wordt aangezet, begint hij stroom te verbruiken tegen een snelheid van 1 kilowatt. Hij blijft één kilowatt trekken zolang hij aanstaat. Met andere woorden, een broodrooster dat permanent aanstaat, verbruikt 1 kilowattuur (kWh) energie per uur, of 24 kWh per dag.

Hoe langer de broodrooster aanstaat, hoe meer energie hij verbruikt. U kunt het energieverbruik berekenen door het vermogen te vermenigvuldigen met de tijdsduur:

$$\text{Energie} = \text{Kracht} \times \text{Tijd}.$$

De internationale standaardeenheid voor energie is de joule, maar helaas is een joule veel te klein om er zinnig mee te werken. Eén kilowattuur is gelijk aan 3,6 miljoen joule (3,6 megajoule). Stroom is zo nuttig en zo belangrijk dat het iets heeft dat waterstroom ontbeert: een eigen speciale eenheid. Als we het over debiet hebben, meten we dat in "liters per minuut" of zelfs "gallons per uur", "kubieke meters per seconde". Met dergelijke eenheden is het vanzelfsprekend dat stroming altijd een "volume per tijdseenheid" betekent. Het vermogen (de energiestroom) van één joule per seconde wordt één watt genoemd. 1000 joule per seconde wordt een kilowatt genoemd. Of specifiek in het bovenstaande voorbeeld: **[028]** De broodrooster verbruikt één kilowatt. Ik zeg niet één kilowatt per seconde, want de "per seconde" is al ingebouwd in de definitie van een watt: Een kilowatt betekent gewoon "een kilojoule per seconde". Analooeg zeg je "een kerncentrale genereert één gigawatt." Een gigawatt is overigens een miljard watt, of een miljoen kilowatt, of 1000 mega-

watt. Dus een gigawatt is een miljoen broodroosters. En, nu we het er toch over hebben: Gigawatt en megawatt worden afgekort met respectievelijk een hoofdletter G en een hoofdletter M (GW, MW), kilowatts met een kleine letter k (kW).

En zeg alstublieft nooit "één kilowatt per seconde", "één kilowatt per uur" of "één kilowatt per dag", want geen van beide is een zinvolle maatstaf voor vermogen. De drang die veel mensen blijkbaar voelen om "per om het even wat" te zeggen wanneer zij het over hun broodrooster hebben, is een van de redenen waarom ik heb besloten "kilowattuur per dag" als mijn meeteenheid te gebruiken. Ik verontschuldig me dat dit soms een beetje lastig is om te zeggen en te schrijven.

Een laatste opmerking: wanneer ik zeg "iemand verbruikt een gigawattuur energie" zeg ik alleen hoeveel energie er wordt verbruikt, niet hoe snel. De term gigawattuur impliceert niet dat de energie in een uur zou zijn verbruikt. Je kunt een gigawattuur verbruiken door een miljoen broodroosters een uur lang aan te zetten, of 1000 broodroosters gedurende 1000 uur.

Zoals gezegd, bereken ik de baten meestal in kWh/d per persoon. Ik hou van deze gepersonaliseerde keuze van eenheden omdat het veel gemakkelijker is om van nationale ratio's in, laten we zeggen, Engeland naar die in andere landen of regio's te gaan. Stel dat we het over afvalverbranding hebben en we stellen vast dat Engeland op deze manier 7 TWh per jaar produceert, Denemarken 10 TWh per jaar. Helpt dat ons te bepalen of Denemarken of Engeland "meer" afval verbrandt? Hoewel de totale energieproductie van afvalverbrandingsinstallaties in een land interessant kan zijn, zullen wij meestal in de eerste plaats geïnteresseerd zijn in de afvalverbranding per persoon. (Voor de goede orde: Denemarken 5 kWh/d per persoon, Engeland 0,3 kWh/d per persoon. De Denen verbranden dus 13 keer meer afval dan de Britten). Om inkt te besparen, kort ik "per persoon" soms af met "/p". Door van meet af aan alles per persoon te bespreken, komen we tot veel gemakkelijker transporteerbare uitspraken, en dat zal hopelijk een blijvende impuls geven aan de wereldwijde discussie over duurzaamheid.

Kleine tussenopmerking!

Is energie niet een behoudsvariabele? Wij hebben het over het gebruik van energie, maar zegt een natuurwet niet reeds dat energie noch kan worden geschapen, noch kan worden vernietigd?

Ja juist, ik ben daar inderdaad onnauwkeurig. In feite is dit een boek over entropie - een nogal lastig iets om uit te leggen, en oneindig veel moeilijker. Wanneer we een kilojoule energie "verbruiken", zetten we in feite een kilojoule energie met lage entropie (bijvoorbeeld elektriciteit) om in een precies gelijke hoeveelheid energie met hogere entropie (bijvoorbeeld hete lucht of heet water). Als wij de energie in deze

zin hebben "gebruikt", is zij er nog steeds, alleen kunnen wij haar gewoonlijk niet een tweede maal gebruiken, omdat alleen energie met lage entropie voor ons "nuttig" is. Soms onderscheiden we de verschillende energieniveaus door de eenheden aan te vullen: 1 kWh(el) is één kilowattuur elektrische energie, wat het hoogste energieniveau is. 1 kWh(th) is een kilowattuur thermische energie, bijvoorbeeld de energie in 10 liter kokend water. Energie in warmere dingen is nuttiger (heeft minder entropie) dan energie in lauwe dingen. [029] Een derde energieniveau is chemische energie. Chemische energie staat ook op een hoog niveau, vergelijkbaar met elektrische energie.

Het is een onzorgvuldige maar handige afkorting om te spreken van energie in plaats van entropie, en wij zullen er in dit boek uitgebreid gebruik van maken. Af en toe zullen we deze onzorgvuldigheid niet kunnen maken, bijvoorbeeld wanneer we het hebben over koeling, elektriciteitscentrales, warmtepompen, of geothermische energie.

Zijn we geen appels en peren aan het vergelijken? Is het geoorloofd verschillende vormen van energie, zoals chemische energie in een auto die op benzine rijdt, te vergelijken met elektriciteit uit een windturbine?

Bij het vergelijken van verschillende verbruiksvormen van energie met denkbare energiebronnen, wil men niet impliceren dat al deze vormen van energie gelijkwaardig en inwisselbaar zijn.

Elektriciteit uit een windturbine is nutteloos voor een benzine-auto, en benzine zal een televisie nauwelijks laten werken. In principe kan men energie omzetten van de ene vorm in de andere, maar de omzetting gaat gepaard met verliezen. Generatoren op fossiele brandstoffen slurpen chemische energie op en produceren elektriciteit (met een rendement van 40% of zo). En aluminiumfabrieken slikken elektrische energie om een zeer hoog chemisch energieproduct, aluminium, te produceren (met een rendement van 30% of zo).

In sommige overzichten van energieproductie en -verbruik worden alle verschillende vormen van energie in dezelfde eenheden omgerekend, maar er worden vermenigvuldigingsfactoren ingevoerd die bijvoorbeeld de elektrische energie uit waterkracht 2,5 maal zo hoog waarderen als de chemische energie in aardolie. Dit opblazen van de effectieve energiewaarde van elektriciteit wordt gerechtvaardigd als: "Welnu, 1 kWh elektrische energie is gelijk aan 2,5 kWh olie, omdat we 40% van de 2,5 kWh elektriciteit uit de olie kunnen halen door een generator van brandstof te voorzien, wat precies 1 kWh is". In dit boek zullen we meestal een één-op-één omrekening gebruiken wanneer we verschillende vormen van energie vergelijken. Het is inderdaad niet waar dat 2,5 kWh olie onontkoombaar gelijk is aan 1 kWh

elektriciteit; dat is alleen waar binnen een wereldbeeld waarin olie wordt gebruikt om elektriciteit te produceren. Maar omgekeerd kun je chemische energie uit elektriciteit halen. In een alternatieve wereld (misschien niet al te ver weg) met relatief veel elektriciteit en weinig olie, ja, zou je elektriciteit kunnen gebruiken om vloeibare brandstoffen te maken. In die wereld zou je zeker niet dezelfde "wisselkoers" hanteren - elk kilowattuur benzine zou dan ongeveer 3 kWh elektriciteit kosten! Daarom denk ik dat de tijdloze en wetenschappelijke manier om vormen van energie te vergelijken is 1 kWh chemische energie gelijk te stellen aan 1 kWh elektriciteit. De keuze voor een één-op-één omrekening betekent ook dat sommige van mijn samenvattingen enigszins afwijken van die van andere auteurs. En ik wijs er nogmaals op dat deze één-op-één omzetting niet impliceert dat men vormen van energie in elkaar kan omzetten zonder verlies. Het omzetten van chemische energie in elektrische energie kost altijd energie, net als het omzetten van elektrische energie in chemische energie.

Natuurkunde en vergelijkingen

In het hele boek probeer ik niet alleen de kengetallen van ons huidige energiegebruik en de denkbare duurzame productie te ontrafelen, maar ook steeds duidelijk te maken waar die getallen van afhangen. Inzicht in deze afhankelijkheden is van essentieel belang als wij een zinvol beleid willen ontwikkelen om de ene of de andere figuur te veranderen. [030] Pas als we de fysica achter energieproductie en -verbruik echt begrijpen, kunnen we beweringen doen als "auto's verspillen 99% van de energie die aan hen wordt geleverd, we zouden auto's kunnen bouwen die 100 keer minder energie nodig hebben". Is deze bewering waar? Om het antwoord te verklaren, zou ik een formule moeten gebruiken, nl.

$$\text{kinetische energie} = \frac{1}{2} m v^2 .$$

Maar ik moest beseffen dat voor veel lezers dergelijke formules als een vreemde taal overkomen. Daarom, hier is mijn belofte: Ik zal al deze vreemde taalformules in de technische hoofdstukken aan het eind van het boek zetten. Elke lezer met een graad in wiskunde, natuurkunde of scheikunde zou van deze hoofdstukken moeten kunnen genieten. De hoofdlijn van het boek (van bladzijde 31 tot bladzijde 271) is zo geschreven dat iedereen die kan optellen, vermenigvuldigen en delen het kan volgen. Zij is in het bijzonder gericht tot onze dierbare verkozen en niet-verkozen vertegenwoordigers in de parlementen.

Een laatste punt voor we beginnen: ik weet niet alles van energie. Ik heb niet alle antwoorden, en de cijfers die ik presenteer kunnen worden herzien en gecorrigeerd (ik verwacht inderdaad correcties en zal ze ook op de website van het boek zetten). Het enige wat ik zeker weet, is dat de antwoorden op onze vragen over energieduurzaamheid cijfers zullen omvatten, net zoals elke gezonde discussie over dit on-

derwerp cijfers nodig heeft. Het boek heeft ze klaar en laat zien wat er mee gedaan kan worden. Ik hoop dat je ervan geniet!

Noten en referenties Noten en referenties

Pagina	
[028]	de "per seconde" is al ingebouwd in de definitie van watt Andere voorbeelden van eenheden waarin "per tijdseenheid" al is ingebouwd zijn knopen - "ons jacht liep 10 knopen" (een knoop is een zeemijl per uur); hertz - "ik kon een gesis horen bij 50 hertz (een hertz is een frequentie met één periode per seconde); ampère - "de zekering springt als de stroom hoger is dan 13 ampère" (niet 13 ampère per seconde!); of paardenkracht paardenkracht - "deze stinkende machine maakt 50 paardenkracht" (niet 50 paardenkracht per seconde, niet 50 paardenkracht per uur, niet 50 paardenkracht per dag, gewoon 50 paardenkracht).
[028]	Zeg nooit "een kilowatt per seconde" Er zijn speciale, zeldzame uitzonderingen op deze regel. Als je het hebt over een toename van de vraag naar elektriciteit, zou je kunnen zeggen: "Het verbruik in het VK neemt toe met 1 gigawatt per jaar". In hoofdstuk 26 bespreek ik fluctuaties in windenergie, ik zou kunnen zeggen: "Op een ochtend stortte de output van Ierse windmolens in met een snelheid van 84 MW per uur". Dus wees alsjeblieft voorzichtig! Zelfs een verspreking kan verwarring veroorzaken: Uw elektriciteitsmeter meet bijvoorbeeld in kilowattuur (kWh), niet "kilowatt per uur".

Ik geef op blz. [376] in het aanhangsel een tabel voor de omrekening van kWh per dag per persoon en de andere belangrijke meeteenheden waarin de voordelen worden besproken.

3 auto's.

Auto's

In ons eerste hoofdstuk over consumptie behandelen we het symbool bij uitstek van de moderne beschaving: De auto met één persoon erin.

Hoeveel energie verbruikt een normale automobilist? Als we de omrekeningsfactoren kennen, is het een eenvoudige berekening:



Fig.3.1: Auto's. Een rode BMW, gedegradeerd tot een dwerg door een ruimteschip van de planeet Dorkon.

$$\text{Energie per dag} = \frac{\text{afgelegde afstand per dag}}{\text{afgelegde afstand per brandstofeenheid}} \times \text{energie per brandstofeenheid}.$$

Voor de afgelegde afstand per dag, laten we uitgaan van 50 km. Voor de afstand per brandstofeenheid, d.w.z. de zuinigheid van de auto, gebruiken wij een gemiddelde waarde van 8,5 liter per 100 km (uit een autoreclame voor een auto uit de midden-klasse), of

$$100 \text{ km} / 8,5 \text{ l} \approx 12 \text{ km per liter}$$

(Het $\approx$ teken betekent "is ongeveer hetzelfde").

Hoe zit het met de energie per eenheid brandstof (ook calorische waarde of energiedichtheid genoemd)? In plaats van het op te zoeken, laten we ons amuseren met het schatten van deze hoeveelheid door wat lateraal denken te doen. Brandstof voor voertuigen, of het nu diesel of benzine is, is koolwaterstof, en koolwaterstoffen vinden we terug op onze ontbijttafel, met de bijbehorende calorische waarden op de verpakking: ongeveer 8 kWh per kg (zie Fig.3.2).



Fig.3.2: Wilt u de energie in brandstoffen voor voertuigen weten? Kijk naar de notities op de boter of margarine. De calorische waarde bedraagt 3000 kJ per 100 g, of 8 kWh per kilo.

Aangezien wij de zuinigheid van de auto hebben geraamd in termen van een volume-eenheid brandstof, moeten wij nu ook de calorische waarde uitdrukken in energie per volume-eenheid. Om de "8 kWh per kg" om te rekenen (een energie per eenheid van massa) in een energie per eenheid van volume, hebben we een

waarde nodig voor de dichtheid van de brandstof. Wat is de dichtheid van boter? Boter drijft in water, benzinevlekken drijven ook in water, dus hun dichtheid moet iets lager zijn dan de dichtheid van water, die 1 kg per liter bedraagt. Als we de dichtheid schatten op 0,8 kg/l, krijgen we

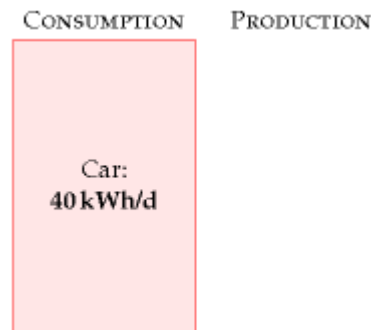
$$8 \text{ kWh per kg} \times 0,8 \text{ kg per liter} \approx 7 \text{ kWh per liter.}$$

In plaats van willens en wetens te blijven rekenen met deze onnauwkeurige schatting, wil ik overgaan op de werkelijke calorische waarde voor benzine, die 10 kWh per liter bedraagt, d.w.z.

$$\begin{aligned} \text{energie per dag} &= \frac{\text{afgelegde afstand per dag}}{\text{afstand per eenheid brandstof}} \times \text{energie per eenheid brandstof} \\ &= \frac{50 \text{ km/dag}}{12 \text{ km/liter}} \times 10 \text{ kWh/liter} \\ &\approx 40 \text{ kWh/dag.} \end{aligned}$$

Gefeliciteerd! Wij hebben onze eerste verbruiksschatting gemaakt. Ik heb dit resultaat uitgezet in de linker stapel van **Fig.3.3**. De hoogte van de rode rechthoek vertegenwoordigt 40 kWh per persoon per dag.

Fig.3.3: De conclusie uit hoofdstuk 3: een doorsnee automobilist verbruikt ongeveer 40 kWh per dag.



De schatting was voor een doorsnee automobilist die vandaag in een doorsnee auto rijdt. In de volgende hoofdstukken zal het *gemiddelde verbruik*, gemiddeld over de gehele bevolking van Engeland, worden besproken. Het is belangrijk in gedachten te houden dat niet iedereen auto rijdt. In deel II zullen wij ook bespreken wat het verbruik zou kunnen zijn, rekening houdend met andere technologieën zoals elektrische auto's.

Waarom legt een auto maar 12 km per liter af? Waar gaat die energie heen? Kunnen we auto's bouwen die 1200 km per liter gaan? Als we het brandstofverbruik van auto's willen verminderen, moeten we de fysica erachter begrijpen. Deze vragen wor-

den beantwoord in het technische hoofdstuk A van de bijlage, waarin een eenvoudige theorie van het autogebruik wordt gepresenteerd. Ik moedig u aan deze hoofdstukken te lezen als formules als $\frac{1}{2}mv^2$ u geen medische problemen geven.

De conclusie van hoofdstuk 3 is dat een doorsnee automobilist ongeveer 40 kWh per dag verbruikt. Vervolgens moeten we nu de juiste stapel - energieproductie - bouwen, zodat we iets hebben om te vergelijken.

Vragen

Hoe zit het met de energiekosten voor de productie van voertuigbrandstof?

Een goed punt. Wanneer ik de energie van een bepaalde activiteit inschat, heb ik de neiging om een vrij strakke "grens" rond die activiteit te hanteren. Deze selectie maakt de schatting gemakkelijker, maar ik ben het ermee eens dat het een goed idee is om het totale energetische effect van een activiteit te schatten. Er is reeds geraamd dat voor de productie van één eenheid benzine 1,4 eenheden aardolie en andere primaire brandstoffen nodig zijn (Treloar et al. 2004).

Hoe zit het met de energiekosten om de auto te produceren?

Ja, ook deze kosten vallen buiten de beschouwing. De autofabricage wordt echter besproken in [hoofdstuk 15](#).

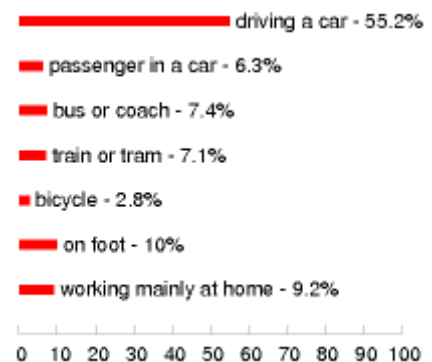


Fig.3.4: Hoe de Engelsen naar hun werk rijden, volgens een enquête uit 2001.



[033] Opmerkingen en referenties

Pagina							
[031]	Laten we voor de dagelijks afgelegde afstand uitgaan van 50 km. Dit komt overeen met 18.000 km per jaar. Ongeveer de helft van de Britse bevolking rijdt naar het werk. Het totale autoverkeer in het VK bedraagt 686 miljard passagierskilometers per jaar, wat resulteert in een "gemiddelde dagelijkse reisafstand per auto van elke Engelsman" van 30 km per dag. Bron: Department for Transport [5647rh]. Zoals uiteengezet op bladzijde 25, heb ik een schatting gemaakt van de consumptie van een "typische redelijk welgestelde persoon" - de consumptie waar veel mensen naar streven. Sommigen rijden niet veel. In dit hoofdstuk wil ik een schatting maken van het verbruik van een persoon die ervoor gekozen heeft auto te rijden, en niet het nationale gemiddelde uitsplitsen, waarin automobilisten en niet-automobilisten door elkaar worden gehaald. Als ik had gezegd "Het gemiddelde energieverbruik voor autorijden in Engeland is 13 kWh/d per persoon", dan hadden veel mensen het vast verkeerd begrepen en bedoeld "Ik ben een automobilist, dus ik verbruik naar schatting 13 kWh per dag".						
[031]	Gemiddelde van 8,5 liter per 100 km: De gemiddelde waarde van Engelse auto's in 2005 [27jdc5] was 33 mijl per gallon (mpg), het equivalent van ongeveer 8,6 liter per 100 km. Benzineauto's verbruiken gemiddeld 31 mpg (9,1 l/100km), dieselauto's 39 mpg (7,2 l/100km), nieuwe benzineauto's (jonger dan 2 jaar) 32 mpg (8,8 l/100km). Bron: Dept. For Transport 2007. Honda, "America's most fuel-efficient car brand", rapporteert dat haar vloot van nieuwe wagens verkocht in 2005 een mediaan brandstofverbruik had van 35 mpg (8.1 l per 100 km) [28abpm].						
[031]	Als we de dichtheid schatten op 0,8 kg/l: De dichtheid van benzine is 0,737, van diesel 0,820-0,950 [nmn4l]. <table border="1" data-bbox="1077 1120 1396 1254"> <thead> <tr> <th colspan="2">calorific values</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>petrol</td> <td>10 kWh per litre</td> </tr> <tr> <td>diesel</td> <td>11 kWh per litre</td> </tr> </tbody> </table>	calorific values		petrol	10 kWh per litre	diesel	11 kWh per litre
calorific values							
petrol	10 kWh per litre						
diesel	11 kWh per litre						
[031]	...gaan over de werkelijke calorische waarde van benzine, die 10 kWh per liter is: ORNL [2hcgdh] geeft de volgende calorische waarden: Diesel: 10,7 kWh/l; vliegtuigbrandstof: 10,4 kWh/l; benzine: 9,7 kWh/l. Als u calorische waarden opzoekt, vindt u het onderscheid tussen calorische waarde (ook "bovenverwarmingswaarde") en verwarmingswaarde (energie-inhoud of energiewaarde). Beide waarden verschillen slechts 6% voor motorbrandstoffen, dus voor onze doeleinden is het onderscheid niet nodig, maar laat me het hier toch uitleggen: De calorische waarde is de waarde van de chemische energie die vrijkomt bij de verbranding van een stof. Een van de verbrandingsproducten is water, en in de meeste machines en energiesystemen gaat er wat energie verloren om dit water te verdampen. De calorische waarde geeft aan hoeveel energie er overblijft na aftrek van deze verdampingsenergie. Als we ons afvragen hoeveel energie onze levensstijl kost, is de calorische waarde de juiste grootte. De calorische waarde daarentegen is voor een exploitant van een fabriek van belang om te beslissen op welke brandstof hij zijn fabriek laat draaien. Ik gebruik calorische waarden in dit boek. Een laatste opmerking voor de pedante spelbrekers die zeggen "boter is geen koolwaterstof": OK, boter is geen zuivere koolwaterstof, maar het is een goede benadering om het hoofdbestanddeel van boter te zien als lange koolwaterstofketens, net als benzine. Het bewijs van het hele verhaal is: deze benadering bracht ons dicht bij het juiste antwoord van 30%. Welkom bij guerrilla fysica.						

4 wind

Wind

Het Verenigd Koninkrijk heeft de beste windbronnen van Europa.
Commissie voor duurzame ontwikkeling

Windparken zullen het platteland zinloos verwoesten.
James Lovelock



Hoeveel windenergie kunnen we eigenlijk opwekken?

We kunnen een schatting maken voor windvermogen op land door het windvermogen per landoppervlak te vermenigvuldigen met het beschikbare landoppervlak per persoon:

Vermogen per persoon = Windvermogen per landoppervlakte x landoppervlakte per persoon.

In bijlage B wordt uitgelegd hoe het vermogen van een windpark per oppervlakte-eenheid kan worden geraamd. Bij een typische windsnelheid van 6 m/s (d.w.z. 22 km/h) levert een windmolenpark ongeveer 2W/m².

Dit is waarschijnlijk te hoog voor veel locaties in Engeland. **Fig.4.1** toont bijvoorbeeld de gemiddelde windsnelheid in Cambridge in 2006, waarbij het daggemiddelde slechts op 30 dagen van het jaar 6 m/s bereikte - zie **Fig.4.6** voor een histogram. Maar sommige plaatsen hebben veel hogere windsnelheden dan 6 m/s, bijvoorbeeld

Cairngorm in Schotland (Fig.4.2).

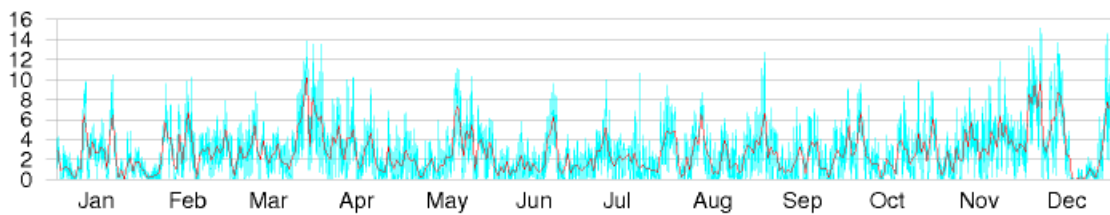


Fig.4.1: Windsnelheden in Cambridge, in m/s, dagelijks (rode lijn) en halfuurlijks (blauw).

[035] Als we ook nog de bevolkingsdichtheid op 250 mensen per vierkante kilometer stellen, of 4000 vierkante meter per persoon, dan zien we dat wind een vermogen heeft van $2\text{W/m}^2 \times 4000\text{ m}^2$ per persoon = 8000 W per persoon in windturbines als we het hele land ermee zouden bedekken. Omgerekend naar onze favoriete eenheid, is dat 200 kWh/d per persoon.

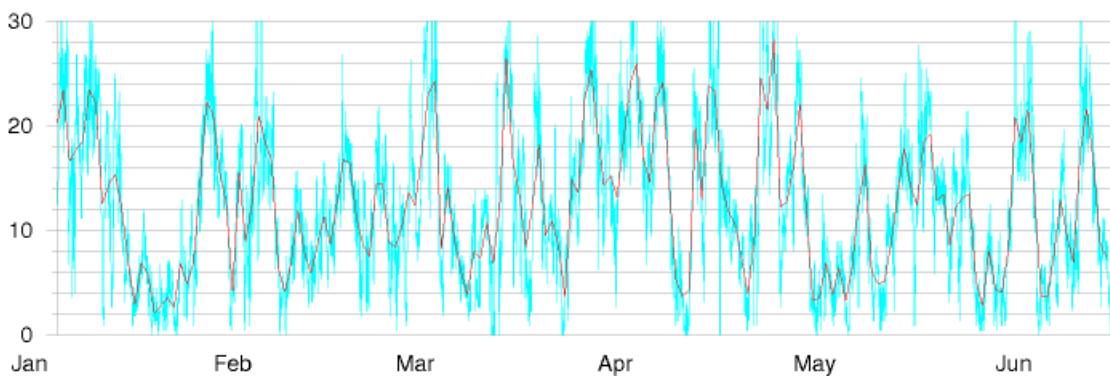


Fig.4.2: Gemiddelde windsnelheden op Cairngorm, in m/s, gedurende zes maanden van 2006.

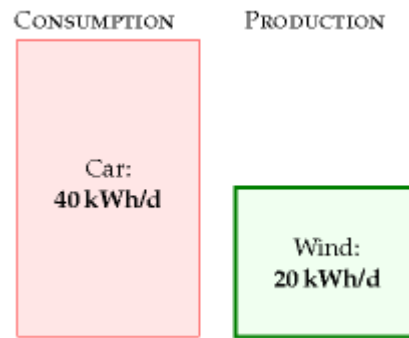
Maar laten we realistisch zijn. Hoeveel land kunnen we ons echt voorstellen te bedekken met windmolens? Misschien 10%? Dan zien we het: Als we de meest windrige 10% van Engeland zouden bedekken met windmolens (die 2 W/m² leveren), zouden we 20 kWh/d per persoon kunnen opwekken, wat slechts de helft is van wat de gemiddelde auto verbruikt om 50 km per dag te rijden.

De on-shore windenergiebronnen van Engeland zijn misschien "groot", maar duidelijk niet zo groot als ons grote verbruik. We zullen het later hebben over de offshore windmolenparken.

Ik moet ook benadrukken hoe genereus deze veronderstellingen zijn. Laten we deze raming van het Britse windpotentieel eens vergelijken met de huidige geïnstalleerde windenergiecapaciteit wereldwijd. De windmolens die nodig zijn om die 20 kWh/d te produceren, zijn gelijk aan 50 maal de output van alle Deense windapparatuur, 7 maal die van alle Duitse windmolenparken, en 2 maal de output van de volledige

vloot van alle windturbines ter wereld.

Fig.4.3: Conclusie van hoofdstuk4: het realistische maximum aan aan land geproduceerde windenergie in Engeland is 20 kWh per dag per persoon.



Begrijp me alsjeblieft niet verkeerd. Heb ik gezegd dat we geen moeite moeten doen om windmolenparken te installeren? Niet in het minst. Ik probeer alleen maar een nuttig feit aan te dragen, namelijk dat windmolenparken, willen zij werkelijk een verschil maken, een zeer, zeer groot bruikbaar gebied vereisen.

[036] Deze conclusie - dat de maximale bijdrage van windenergie op land weliswaar "groot" is, maar toch veel kleiner dan onze vraag - is belangrijk, dus laten we voor het "kengetal" daarin, het veronderstelde vermogen per oppervlakte-eenheid ($2\text{W}/\text{m}^2$), nog eens een cross-check doen met een echt Engels windmolenpark.

Vermogen per opp.-eenheid	
Windmolenpark (snelheid 6 m/s)	2 W/m ²

Tabel 4.4: Windparken

Bevolkingsdichtheid in Engeland
250 per km ² ↔ 4000 m ² per persoon

Tabel 4.5: Bevolkingsdichtheid (bijlage J)

Whitelee Windfarm nabij Glasgow in Schotland heeft 140 turbines met een gecombineerd piekvermogen van 322 MW over een gebied van 55 km². Dit is $6\text{ W}/\text{m}^2$, piek. De gemiddelde output is lager omdat natuurlijk niet alle turbines de hele tijd op maximaal vermogen draaien. De verhouding tussen het gemiddelde vermogen en het piekvermogen wordt de "belastingsfactor" of "capaciteitsfactor" genoemd en varieert van turbine tot turbine en met de hardware die op de turbine is geïnstalleerd; een typische factor voor een goede turbine bij moderne turbines is 30%. Als we voor Whitelee uitgaan van een belastingsfactor van 33%, dan is het gemiddelde vermogen per oppervlakte-eenheid $2\text{W}/\text{m}^2$ - precies de waarde die we ook hadden gebruikt in onze veronderstelling over vermogensdichtheid.

Vragen

Windturbines worden steeds groter en groter. Kunnen grotere turbines de in dit hoofdstuk gegeven antwoorden veranderen?

De toelichting staat in aanhangsel B. Grotere turbines zijn financieel voordeliger,

maar het vermogen per oppervlakte-eenheid neemt er niet significant door toe, omdat grotere windmolens op grotere afstanden van elkaar moeten worden geplaatst. Als je de hoogtes van de windmolens op een boerderij verdubbelt, krijg je maar ongeveer 30% meer stroom.

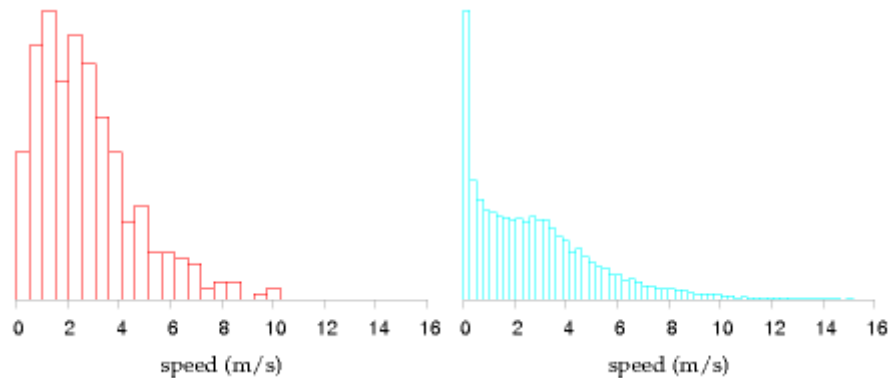


Fig.4.6: Histogram van de gemiddelde windsnelheid in Cambridge in m/s: Dagelijks gemiddelde (links), en halfuurlijks gemiddelde (rechts).

Windkracht fluctueert de hele tijd. Dat maakt wind toch minder bruikbaar?

Misschien. We komen hierop terug in hoofdstuk 26, waar we kijken naar de intermitterendheid van wind en verschillende mogelijke oplossingen voor dit probleem bespreken, waaronder energieopslag en vraagbeheer.

[037] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[035]	Fig.4.1 en Fig.4.6: Windgegevens voor Cambridge van Digital Technology Group, Computer Laboratory, Cambridge [vxhhj]. Het weerstation staat op het dak van het Gates-gebouw, ongeveer 19 m hoog. De windsnelheden op 50 m zijn gewoonlijk 25% hoger. Gegevens voor Cairngorm (Fig.4.2) van de afdeling fysica van de Heriot-Watt Universiteit [tdvml].
[035]	50 maal de capaciteit van de totale Deense windapparatuur: uitgaande van een belastingsfactor van 33% vereist de gemiddelde vraag van 20 kWh/d per persoon een geïnstalleerde piekcapaciteit van 150 GW. Eind 2006 had Denemarken 3,1 GW geïnstalleerde capaciteit, Duitsland 20,6 GW. Wereldwijd was er 74 GW (wwindea.org). Overigens bedroeg de belastingsfactor in Denemarken in 2006 22%, en genereerde de totale windenergie een gemiddelde output van 3 kWh/d per persoon.

5 vliegtuigen

Vliegtuigen

Stel je voor dat ze één intercontinentale vliegreis per jaar maakten. Hoeveel energie zou dat kosten?

Een Boeing 747-400 vervoert 416 passagiers 14.200 km op 240.000 liter brandstof. De calorische waarde van de brandstof is weer zoals afgeleid in hoofdstuk 3 10 kWh per liter. Dan het energieverbruik van een retourvlucht, gelijkelijk verdeeld over alle passagiers:

$$\frac{2 \times 240.000 \text{ liter}}{416 \text{ passagiers}} \times 10 \text{ kWh/liter}$$

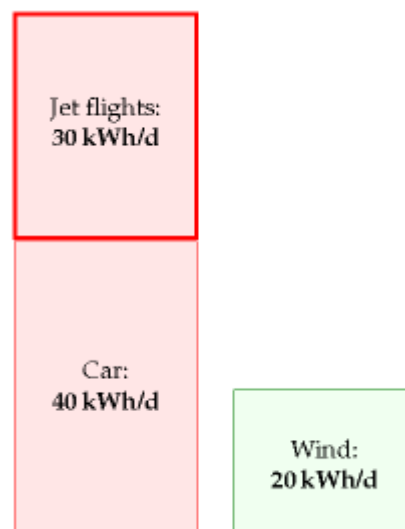
$\approx 12.000 \text{ kWh per passagier.}$



Als u één zo'n vlucht per jaar maakt, is het bijbehorende gemiddelde energieverbruik per dag

$$\frac{12.000 \text{ kWh}}{365 \text{ dagen}} \approx 33 \text{ kWh/dag}$$

Fig.5.1: Het maken van één intercontinentale reis per jaar komt overeen met een verbruik van 30 kWh per dag



14.200 km is iets verder dan Londen naar Kaapstad (10.000 km) of Londen naar

Los Angeles (9000 km), dus ik denk dat we de typische afstand van een intercontinentale reis overschat hebben; maar we hebben ook overschat hoe vol het vliegtuig is, en de energiekosten per persoon zijn hoger wanneer het vliegtuig niet vol is. Dus als we de schaal verlagen met een factor 10.000 km / 14.200 km om een schatting te krijgen voor Kaapstad, en weer verhogen met een factor 100 / 80 om rekening te houden met het feit dat het vliegtuig slechts voor 80% vol is, krijgen we 29 kWh per dag. Om het gemakkelijker te onthouden, ronden we gewoon af naar 30 kWh per dag.

Tabel.5.3: *Efficiëntie van het passagiersvervoer, uitgedrukt in energie per 100 passagierskilometers.*

	Energie per afstand (kWh per 100 p-km)
Auto (4 personen)	20
Ryanair-vliegtuigen (in 2007)	37
Bombardier Q400, vol	38
747, vol 42 747, 80% vol	53
Ryanair-vliegtuigen (in 2000)	73
Auto (1 persoon)	80

Laten we ons realiseren wat dit betekent. Eén keer per jaar vliegen Q9⁹ kost iets meer energie dan een elektrisch fornuis van 1 kW dat permanent aanstaat, 24 uur per dag, het hele jaar door.

Net zoals de schatting van de energiebehoefte van auto's in hoofdstuk 3 vergezeld gaat van bijlage A, waarin wordt gemodelleerd waar de energie in auto's naartoe gaat, wordt in het [039] technisch anhangsel van dit hoofdstuk besproken (aanhangsel C), waar de energie in vliegtuigen naartoe gaat. Aan de hand van bijlage C kunnen we vragen beantwoorden als "Zou het luchtverkeer aanzienlijk energie-efficiënter zijn als we in langzamere vliegtuigen vliegen?" Het antwoord is nee: in tegenstelling tot voertuigen op wielen, die efficiënter kunnen worden naarmate ze langzamer gaan, zijn vliegtuigen bijna zo efficiënt als theoretisch mogelijk is. Vliegtuigen gebruiken onvermijdelijk energie om twee dingen te doen: zij moeten de lucht naar beneden duwen om omhoog te blijven, en zij moeten de weerstand van de lucht tegen de stroming overwinnen. Veranderingen aan het vliegtuig kunnen de efficiëntie niet meer drastisch verbeteren. Een verbetering van 10%? Ja, mogelijk. Een verdubbeling van de efficiëntie? Dan zou ik mijn sokken netjes opeten.



Fig.5.2. Bombardier Q400 Next-Gen. www-q400.com.

⁹) uitgaande van een vliegafstand van 20000 km. (Duits commentaar snap ik niet.)

Fornuis verbruikt 24 kW (/dag) ! En wat ik mis is de terugvlucht ????? dus $2 \times 30 = 60$ kW

Vragen

Zijn turboprops niet veel energie-efficiënter?

Nee, de "aanzienlijk groenere" Bombardier Q400 NextGen, "de technologisch meest geavanceerde turboprop ter wereld" verbruikt 3,81 liter per 100 passagiers-km (bij een vliegsnelheid van 667 km/u), volgens de fabrikant [www-q400.com], wat neerkomt op 38 kWh aan energieverbruik per 100 p-km. De volledig bezette 747 heeft een verbruik van 42 kWh per p-km. Beide vliegtuigen zijn dus twee keer zo zuinig als een auto (die alleen door de bestuurder wordt gebruikt) (wederom uitgaande van de Europese middenklasse-auto uit hoofdstuk 3).

Is vliegen op de een of andere manier bijzonder schadelijk voor het klimaat?

Ja, volgens deskundigen, maar de verklaringen zijn nog enigszins onzeker [3fbufz]. Vliegen produceert naast CO₂ nog andere broeikasgassen, zoals stikstofoxiden. Als u uw CO₂-voetafdruk in ton CO₂-equivalent wilt berekenen, moet u de huidige CO₂-uitstoot van uw vluchten met een factor 2 of 3 extrapoleren. In de grafieken in dit boek is deze factor echter niet opgenomen, omdat we ons willen concentreren op de energievoetafdruk.

Het beste wat we kunnen doen met milieuactivisten is ze neerschieten.

Michael O'Leary, CEO van Ryanair [3asmgy]

Pagina	
[038]	Boeing 747-400 - gegevens zijn van [9ehws]. De vliegtuigen zitten vandaag niet helemaal vol. Luchtvaartmaatschappijen zijn trots als hun gemiddelde vullingsgraad 80% is. Easyjet-vliegtuigen zitten gemiddeld voor 85% vol. (Bron: thelondonpaper dinsdag 16 januari 2007.) Een 80% volle 747 verbruikt ongeveer 53 kWh per 100 passagierskilometers. Hoe zit het met korte afstandsvluchten? In 2007 had Ryanair, "Europa's groenste luchtvaartmaatschappij", een transportkost van 37 kWh per 100 p-km [3exmgv]. Dit betekent dat vliegen in Europa met Ryanair ongeveer evenveel energie kost als alle passagiers met twee tegelijk in een auto naar hun bestemming brengen. (Voor een schatting van hoe het eruit ziet bij andere luchtvaartmaatschappijen: In 2000, vóór de groene investeringen van Ryanair, bedroeg hun brandstofverbruik meer dan 73 kWh per 100 P-km). Londen naar Rome is 1430 kilometer; Londen naar Malaga is 1735 kilometer. Zo kost een retourtje Rome met de groenste luchtvaartmaatschappij 1050 kWh, en een retourtje Malaga 1270 kWh. Dus als u één keer per jaar naar Rome en naar Malaga vliegt, is uw gemiddelde stroomverbruik 6,3 kWh/d met de groenste luchtvaartmaatschappij en mogelijk 12 kWh/d met een minder groene maatschappij. Hoe zit het met frequente vliegers? Om een zilveren frequent flyer kaart van een intercontinentale luchtvaartmaatschappij te krijgen, moet je al 25.000 mijl per jaar toeristenklasse vliegen. Dat is ongeveer 60 kWh per dag als je rekent met de getallen in dit hoofdstuk en ervan uitgaat dat de vliegtuigen voor 80% vol zitten. Hier zijn enkele aanvullingen van het Intergovernmental Panel on Climate Change [yrnmum]: een volle 747-400 met losse stoelen (262 zitplaatsen) heeft een energieverbruik van 50 kWh per 100 p-km voor een vlucht van 10.000 kilometer. Met krappe zitplaatsen (568 stoelen) op een vlucht van 4000 kilometer heeft hetzelfde vliegtuig een energieverbruik van 22 kWh per 100 P-km. Een Tupolev-154 voor korte afstanden die 2.235 kilometer vliegt met 70% van de 164 zitplaatsen bezet, verbruikt 80 kWh per 100 P-km. Fig.5.5: Twee korteafstandsvluchten met de groenste korteafstandsluchtvaartmaatschappij: 6,3 kWh/d. Frequent flyer met bonusstatus zilver: 60 kWh/d.
[039]	Veranderingen aan het vliegtuig kunnen de efficiëntie niet meer drastisch verbeteren. De huidige doelstelling van de Advisory Council for Aerospace Research in Europe (ACARE) is een vermindering met 50% van de brandstofvraag per P-km (ten opzichte van het uitgangspunt in 2000), waarbij voor motoren een verbetering van 15-20% wordt verwacht. Volgens mededelingen uit 2006 is Rolls Royce halverwege dit doel [36w5gz]. Dennis Bushnell, wetenschappelijk directeur van NASA's Langley Re-



Fig.5.4: Ryanair Boeing 737-400. foto door Adrian Pingstone

Short hauls: 6 kWh/d



	search Center, lijkt het eens te zijn met mijn algemene beoordeling van de vooruitzichten voor prestatieverbeteringen in de luchtvaart. De luchtvaartindustrie is volwassen geworden. "Op de lange termijn valt er niet veel te winnen, behalve minimale procentuele verbeteringen." (New Scientist, 24 februari 2007, blz. 33.) Het radicaal herontworpen "Silent Aircraft" [silentaircraft.org/sax40] zou, als het gebouwd zou worden, volgens theoretische voorspellingen 16% efficiënter zijn dan een conventioneel vliegtuig (Nickol, 2008) Als het ACARE-doel wordt bereikt, zal dat waarschijnlijk in de eerste plaats gebeuren door vollere vliegtuigen en beter luchtverkeersbeheer.

6 zonnepanelen

Zonepanelen

Wij willen verder inschatten hoe de consumptie zich verhoudt tot de productie. In de laatste drie hoofdstukken hebben wij geconstateerd dat aan de uitgavenzijde auto rijden en vliegen groter zijn dan het realistische windenergiepotentieel van Engeland op het vasteland. Kan zonne-energie de inkomstenzijde weer aan de leiding brengen?

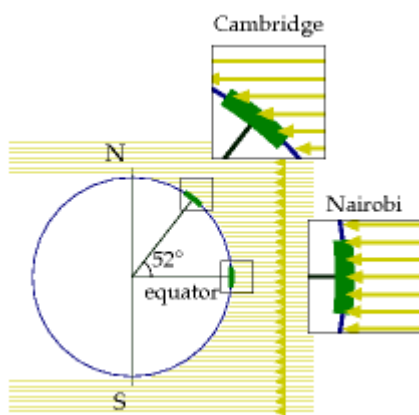
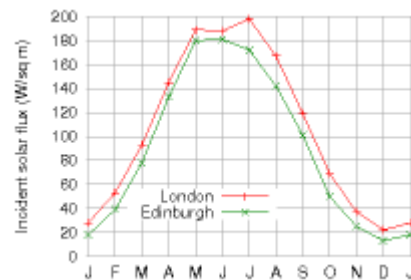


Fig.6.2: Gemiddelde zonne-intensiteit in Londen en Edinburgh, als functie van het seizoen. De gemiddelde intensiteit per landeenheid bedraagt 100 W/m^2 .

Fig.6.1: Zonlicht op de aarde op het middaguur op een dag in de herfst of lente. De radiantie per landeenheid bedraagt ongeveer 60% van de equatoriale waarde te Cambridge (52e breedtegraad).



Het natuurlijke vermogen van zonneschijn op een onbewolkte middag is 1000 W per vierkante meter. Dit is voor loodrechte insolutie, voor één vierkante meter naar de zon gericht gebied, niet 1 m^2 landoppervlak. Om het vermogen per landoppervlakte te bepalen, hebben we enkele correcties nodig. Er moet rekening worden gehouden met de helling tussen de zonnestraling en het land, waardoor de intensiteit van de middagzon tot ongeveer 60% van de waarde op de evenaar wordt vermindert. (**Fig.6.1**). Ook verliezen we iets doordat het niet de hele tijd middag is. Op een onbewolkte dag in maart of in september ligt de verhouding tussen de gemiddelde intensiteit en de middagintensiteit dicht bij 32%. En op een gemiddelde plaats in Engeland schijnt de zon maar zo'n 34% van de daglichturen.

De combinatie van deze drie factoren, plus de extra complicatie van de wisseling van de seizoenen, leidt tot de conclusie dat de gemiddelde natuurlijke zoninstraling

op een vierkante meter zuidgericht dak in Engeland ongeveer 110 W/m^2 bedraagt, en op een vlakke ondergrond ongeveer 100 W/m^2 . Wij kunnen deze natuurlijke kracht nu op een aantal manieren omzetten in nuttige kracht:

1. thermische zonne-energie: gebruik van de zon om gebouwen of water rechtstreeks te verwarmen.
2. Fotovoltaïsche – zonnepanelen – zonne-energie om elektriciteit op te wekken
3. biomassa uit zonne-energie: verwerking van bomen, bacteriën, algen, granen, sojabonen of oliehoudende zaden tot brandstoffen, chemische stoffen of bouwmaterialen. [043]
4. voedsel: hetzelfde als biomassa op zonne-energie, behalve dat we planten rechtstreeks naar mensen of andere dieren transporteren.

(In een later hoofdstuk zullen we ook enkele andere zonne-energietechnieken voor woestijngebieden leren kennen).

Laten we snel ruwe schattingen maken van de maximale realistische output die elk van deze technieken kan leveren. Wij verwaarlozen hun economische kosten en de kosten voor de vervaardiging en het onderhoud van de nodige energie-uitrusting.

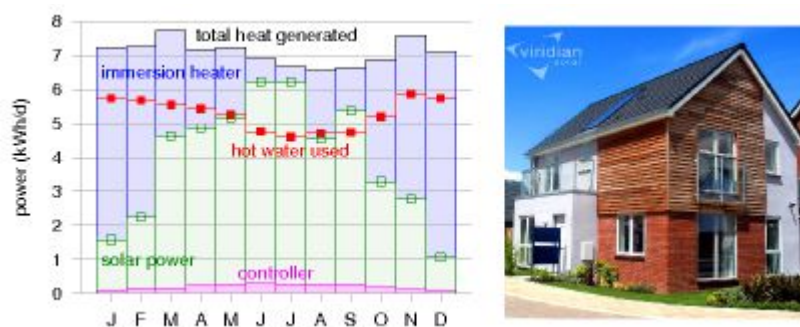


Fig.6.3: Zonne-energie opgewekt door een module van 3 m^2 voor warm water (groen) en bijkomende warmtebehoefte (blauw) voor de productie van warm water in het testhuis van Viridian Solar. (De foto toont een huis met zo'n module op het dak.) De gemiddelde zonne-output van de 3 m^2 was $3,8 \text{ kWh/d}$. Het experiment simuleerde de warmwaterbehoefte van een gemiddeld Europees huishouden - 100 l warm (60°C) water per dag. Het verschil van $1,5\text{-}2 \text{ kWh/d}$ tussen de totale geproduceerde energie (zwarte lijn bovenaan) en het gebruikte warme water (rode lijn) was te wijten aan warmteverliezen. De lijn in magenta toont het elektrisch vermogen dat nodig is voor de werking. Het gemiddelde vermogen per oppervlakte-eenheid voor deze module is 53 W/m^2 .

Thermische zonne-energie

De eenvoudigste zonne-energietechnologie is een module die water verwarmt. Stel dat we alle daken op het zuiden zouden uitrusten met **zonnepanelen** – zonneboiler – dat zou neerkomen op ongeveer 10 m^2 panelen per persoon - en stel verder dat

deze panelen een rendement hebben van 50% waarbij ze de 110 W/m² zonlicht omzetten in warm water (fig.6.3). We vermenigvuldigen

$$50 \% \times 10 \text{ m}^2 \times 110 \text{ W/m}^2$$

en vinden zo dat zonneboilers 13 kWh per dag per persoon kunnen opleveren. Ik teken deze rechthoek in fig.6.4 in het wit om aan te geven dat het hier om energie op laag niveau gaat - warm water is minder waardevol dan de elektriciteit op hoog niveau die door een windturbine wordt geleverd. Warmte kan niet aan het elektriciteitsnet worden toegevoerd. Als warmte niet nodig is, is het gratis. We moeten er rekening mee houden dat veel van deze warmte niet op de juiste plaats beschikbaar zal zijn. In steden waar veel mensen wonen, heeft de woningbouw minder dakruimte dan het nationale gemiddelde. Bovendien wordt de gewonnen warmte niet gelijkmatig over het jaar verdeeld.

[044] Fotovoltaïsche energie

Fotovoltaïsche (PV) modules zetten zonlicht om in elektriciteit. Typische fotovoltaïsche modules – zonnepanelen – hebben een rendement van 10%, zeer geavanceerde en dure modules tot 20%. (De fundamentele wetten van de fysica beperken het rendement van fotovoltaïsche systemen tot maximaal 60% met perfect gerichte spiegels en lenzen, en tot 45% zonder scherpstelling. Een module voor de massamarkt met een rendement van 30% zou zeer opmerkelijk zijn). Dus de gemiddelde opbrengst van een PV-module in Engeland, bij 20% rendement en gericht op het zuiden, is

$$20\% \times 110 \text{ W/m}^2 = 22 \text{ W/m}^2.$$

Fig.6.5 toont gegevens die deze figuur bevestigen. Laten we nu elke persoon 10 m² van de duurdere (20% efficiënte) zonnepanelen geven en alle daken op het zuiden ermee bedekken. Dit geeft dan

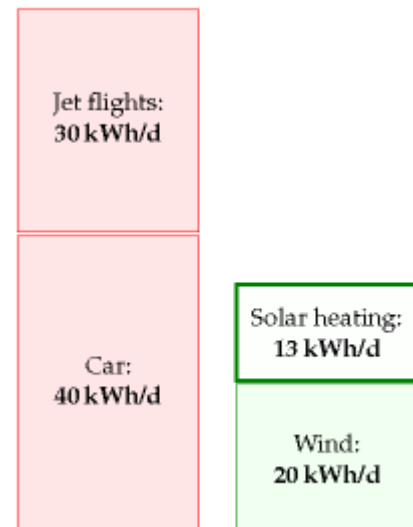


Fig.6.4: Thermische zonne-energie: 10 m² thermische modules kunnen (gemiddeld) 13 kWh/d aan thermische energie leveren.

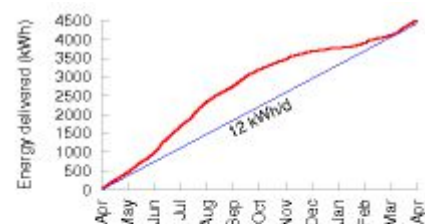


Fig.6.5: Fotovoltaïsche energie: gegevens van een 25 m² grote module-opstelling in Cambridgeshire in 2006. De piekopbrengst van deze opstelling is ongeveer 4 kW. Het gemiddelde over het jaar is 12 kWh per dag. Dit is 20 W per vierkante meter moduleoppervlak.

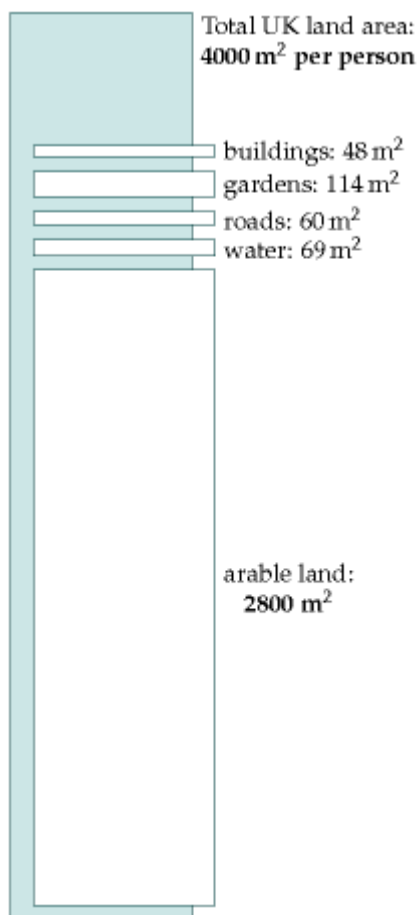
5 kWh per dag per persoon.

Aangezien de oppervlakte van daken op het zuiden slechts ongeveer 10 m^2 per persoon bedraagt, is er zeker niet genoeg ruimte voor deze PV-panelen en de thermische zonnepanelen uit het laatste deel. We moeten dus eigenlijk beslissen of we de ene of de andere bijdrage toevoegen. Hoe dan ook, ik ga met beide in de productiestapel. Momenteel zijn PV-modules ongeveer vier keer zo duur als thermische modules, maar ze leveren half zoveel energie, zij het van de hoogste kwaliteit: elektriciteit. Daarom zou ik een gezin dat zonne-energie overweegt, adviseren eerst naar thermische zonne-energie te kijken. De slimste optie, althans in zonnige gebieden, wordt geboden door gecombineerde systemen die zowel elektriciteit als warm water leveren uit één enkel systeem. Deze weg werd voor het eerst bewandeld door Heliodynamics, dat de totale kosten van zijn systemen verlaagt door kleine PV-modules van hoge kwaliteit van galliumarsenide te omringen met kleine vlakke spiegels die kunnen worden gevolgd. De spiegels richten zonlicht op de PV-modules, die elektriciteit en warm water leveren; het warme water wordt geproduceerd door water langs de achterkant van de PV-modules te pompen.



Afb.6.6: twee zonnekrijgers genieten van hun PV-systeem, dat hun elektrische auto's en hun huis van stroom voorziet. Het array van 120 modules (elk 300 W of $2,2 \text{ m}^2$) heeft een totale oppervlakte van 268 m^2 , een piekvermogen (vóór omvormerverliezen) van 30,5 kW, en een gemiddeld vermogen - in Californië in de buurt van Santa Cruz - van 5 kW (19 W/m^2). Foto met dank aan Kenneth Adelman [www-solarwarrior.com](http://www.solarwarrior.com)

[045] De realisatie tot nu toe: PV op de zuidkant van het dak van uw huis zou genoeg elektriciteit moeten opwekken om in een flink deel van uw persoonlijke elektriciteitsbehoefte te voorzien, maar daken zijn niet groot genoeg om een grote rol te spelen in de totale energiebehoefte. Om meer te bereiken met PV, moeten we van het dak af en op vaste grond komen. De twee *zonnekrijgers* in Fig.6.6 wijzen de weg.



Zonneboerderijen (Zonneweides)

Als er een doorbraak zou zijn in de zonnetechnologie en de kosten van fotonvoltaïsche panelen ver genoeg zouden dalen om ze overal in het landschap te kunnen plaatsen, wat zou dan de maximaal haalbare energieproductie zijn? Nou, als we 10% efficiënte panelen op 5% van Engeland zetten, zou dat ons

$10\% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ per persoon} \approx 50 \text{ kWh/d}$ per persoon.

Overigens was ik uitgegaan van een rendement van slechts 10%, omdat voor grondgebonden systemen PV-modules in grote hoeveelheden tegen lage kosten beschikbaar moeten zijn, en de minder efficiënte modules als eerste steeds goedkoper zullen worden. De vermogensdichtheid (vermogen per oppervlakte-

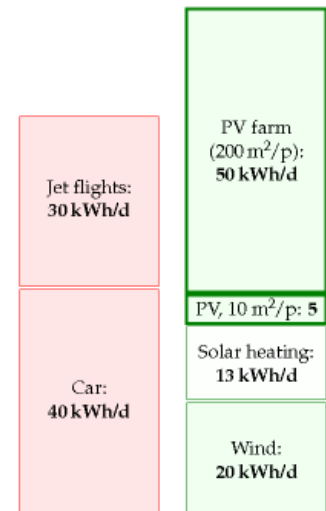
Fig.6.8: Landoppervlak per persoon in Engeland.

eenheid) van dergelijke zonneparken zou

$$10\% \times 100 \text{ W/m}^2 = 10 \text{ W/m}^2.$$

Dit is twee keer zoveel als nu bijvoorbeeld door het Bavaria Solar Park wordt bereikt (**fig.6.7**). [046]

Fig.6.9: (rechts) Fotovoltaïsche panelen: 10 m² modules (op het zuiden op het dak) met een rendement van 20% leveren ongeveer 5 kWh/d elektrische energie. Indien 5% van het landoppervlak zou worden bedekt met grondsystemen met een rendement van 10% (200 m² modules per persoon), zouden deze 50 kWh/d per persoon opleveren.



Kan deze vloed van zonnepanelen samengaan met het leger van windmolens uit hoofdstuk 4? Yep, zonder problemen: Windmolens werpen weinig schaduw en PV-modules op de grond hebben weinig effect op de wind. Hoe moedig is dit plan? De PV-capaciteit die nodig is om de 50 kWh/d per persoon te leveren is meer dan 100 keer groter dan de huidige wereldwijd geïnstalleerde PV. Moet ik zonneparken opnemen in mijn productiestapel? Dat is waar twee harten in mijn borstkas wonen. Enerzijds heb ik in het begin gezegd dat ik wilde nagaan hoe de wetten van de fysica duurzame energieproductie beperken en bijvoorbeeld financieringsaspecten verwaarlozen. Op deze basis zou ik het landschap gemakkelijk moeten industrialiseren en er zonneparken in moeten opnemen.

Aan de andere kant wil ik mensen helpen uit te zoeken wat haalbaar zou zijn tussen nu en 2050. En vandaag is PV-elektriciteit vier keer zo duur als de marktprijs. Ik denk dat het een beetje onverantwoord is om deze schattingen op te nemen in de productiestapel van **Fig.6.9** - 5% van Engeland bedekken met PV-panelen lijkt in vele opzichten buiten alle plausibele grenzen. Als het ons menens zou zijn om zoiets voor elkaar te krijgen, zou het misschien beter zijn om de panelen in een land te zetten dat twee keer zo zonnig is, en een deel van de



Afb.6.7: Een 6,3 MW (piek) PV-systeem op de grond, het zonnepark in Mühlhausen, Beieren. Het gemiddelde vermogen per eenheid landoppervlak zal waarschijnlijk ongeveer 5W/m² bedragen. Foto: SunPower.

energie via stroomkabels naar huis te sturen. Op dit idee komen wij in hoofdstuk 25 terug.

[047] Mythen en legenden

Het maken van een PV-module vergt meer energie dan het ooit kan leveren.

Vals. De energieopbrengstratio (d.w.z. de verhouding tussen de energie die een systeem levert en de energie die nodig is om het te maken) van een op het dak gemonteerd zonne-energiesysteem dat het net voedt, bedraagt in Midden- en Noord-Europa 4 (veronderstelde levensduur van 20 jaar), en meer dan 7 in zonniger streken zoals Australië (Richards and Watt, 2007). Een energieopbrengstverhouding van meer dan één betekent dat het systeem energetisch "goed" is. Windturbines met een levensduur van 20 jaar hebben een energieopbrengstverhouding van 80.

Worden PV-modules efficiënter naarmate de technologie voortschrijdt?

Ik ben er zeker van dat fotonvoltaïsche modules goedkoper worden; en ook dat ze steeds minder energie-input vergen om te produceren, zodat hun verhouding energie-opbrengst verbetert. Maar de PV-ramingen in dit hoofdstuk staan los van economische overwegingen, en ook van de energiekosten van de fabricage. PV-modules met een rendement van 20% zitten al dicht bij de theoretische grens (zie de noten aan het eind van het hoofdstuk). Het zou mij verbazen als de schattingen in dit hoofdstuk van PV op daken ooit nog eens aanzienlijk naar boven zouden worden bijgesteld.

Biomassa

Plotseling, weet je, kunnen we in de energie business zitten door gras te laten groeien op de ranch! En het laten oogsten en omzetten in energie. Dat is wat er bijna gebeurt.

George W. Bush, februari 2006

Alle beschikbare bio-energie-oplossingen houden in dat er eerst groen spul wordt verbouwd en dat er vervolgens iets mee wordt gedaan. Hoeveel energie kan het groene spul verzamelen? Er zijn vier basismanieren om energie te onttrekken aan biologische systemen op zonne-energie:

1. we kunnen geselecteerde planten kweken en ze vervolgens verbranden in speciale installaties die elektriciteit of warmte of beide produceren. Dit is wat wij "koolstofvervanging" noemen.
2. we kunnen bepaalde gewassen verbouwen (bijvoorbeeld canola, suikerriet of maïs), er ethanol of biodiesel van maken en die dan als brandstof in auto's, treinen, vliegtuigen en dergelijke stoppen. Of we zouden genetisch gemodificeerde bacteriën, cyanobacteriën of algen kunnen kweken, die rechtstreeks waterstof, ethanol of butanol, of zelfs elektriciteit produceren. Dergelijke benaderingen noemen we "olievervanging".
3. we kunnen bijproducten van de landbouweconomie verbranden in energiecentrales. Deze bijproducten variëren van stro (bijproduct van mueslirepen) tot kippenpoep (bijproduct

van McNuggets). Het verbranden van bijproducten is opnieuw een vervanging van steenkool, alleen gebruikt u eenvoudige gewassen, geen energierijke gewassen. Een energiecentrale die bijproducten verbrandt, zal per hectare veel minder produceren dan een geoptimaliseerde biomassateelt, maar heeft het voordeel dat het land niet zo scheef wordt gebruikt. Het verbranden van methaangas uit stortplaatsen is een soortgelijke manier om energie op te wekken, maar het is alleen duurzaam zolang we een duurzame bron van afval hebben om op de stortplaatsen te gooien. [048] (Het meeste methaangas op stortplaatsen is afkomstig van voedselafval; in Engeland gooien de mensen ongeveer 300 g voedsel per persoon per dag weg). Het verbranden van huishoudelijk afval is een andere - nauwelijks minder recycleerbare - manier om energie uit biomassa te halen.

4. we kunnen gewassen verbouwen en die rechtstreeks aan energiehongerige mensen of dieren voeren.

In al deze processen bevindt de eerste halte van energie zich in een chemisch molecuul zoals de koolwaterstof in een groene plant. We krijgen dus een schatting voor al deze processen door het vermogen te bepalen dat door dat eerste station kan stromen. In alle volgende stappen - of het nu gaat om tractoren, dieren, chemische fabrieken, stortplaatsen of elektriciteitscentrales - kan het vermogen alleen maar afnemen. Daarom is het vermogen Q_{10}^{10} van het eerste station een theoretische bovengrens voor al het vermogen dat beschikbaar kan worden gemaakt door een op planten gebaseerde energietechnologie.

Afb.6.10: *Miscanthus*gras naast Dr. Emily Heaton, dat 163 cm hoog is. In Engeland kan *Miscanthus* 0,75 W/m^2 vermogen per oppervlakte-eenheid bereiken. Foto: Universiteit van Illinois.



10) Q_{10} Welk ja komt overeen met energie (flux), zoals hierboven afgeleid ...

Laten we dus gewoon de prestaties van dit eerste station schatten. (In aanhangsel D gaan wij meer in detail en bepalen wij de maximale bijdrage van elk proces). Het gemiddelde zonlichtrendement in Engeland is 100 W/m^2 . De meest efficiënte centrales in Europa zijn ongeveer 2% efficiënt in het omzetten van zonne-energie in koolwaterstoffen. Dit suggereert dat planten ongeveer 2 W/m^2 zouden kunnen leveren; hun efficiëntie neemt echter af bij hogere lichtniveaus en de beste opbrengst van energiegewassen in Europa ligt eerder bij $0,5 \text{ W/m}^2$.

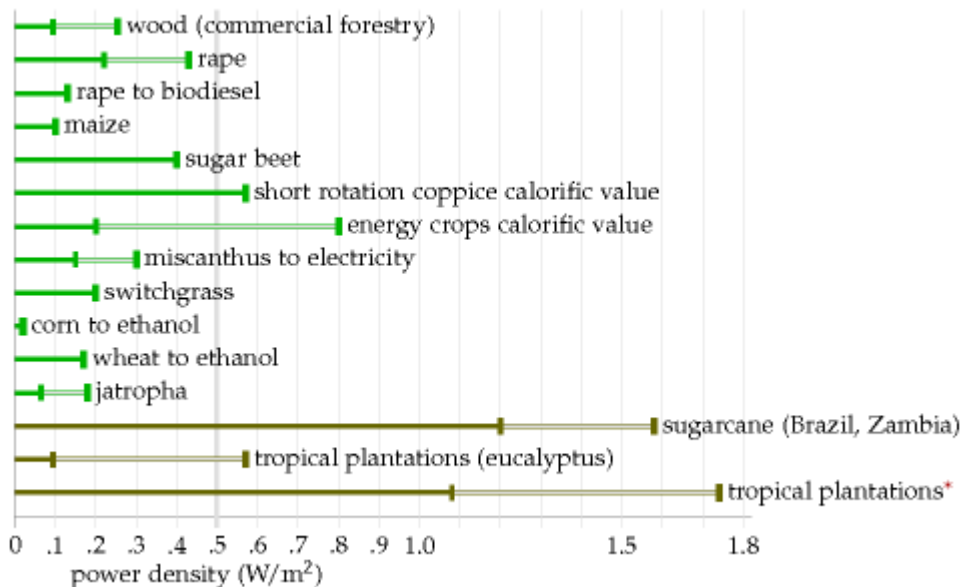


Fig.6.11: Energieproductie per oppervlakte-eenheid die door verschillende installaties kan worden bereikt. (Bronnen zie referenties) Vermogensdichtheden variëren naar gelang van irrigatie en bemesting; in sommige gevallen worden bereiken aangegeven, b.v. hout is $0,095\text{--}0,254 \text{ W/m}^2$. De laatste drie balken staan voor tropische planten, waarbij de laatste uitgaat van genmodificatie, bemesting en irrigatie. In de tekst gebruik ik $0,5 \text{ W/m}^2$ als de gemiddelde waarde voor de beste energiegewassen in NW-Europa.

Als we 75% van het land bestrijken met 049 [049] hoogwaardig groen bedekken, dat is 3000 m^2 per persoon die we aan bio-energie besteden. Dat is evenveel grond als er nu in gebruik is als landbouwgrond. Dus, zonder rekening te houden met alle extra kosten van het kweken, oogsten en verwerken van het groen, is het maximaal beschikbare vermogen

$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 3000 \text{ m}^2 \text{ per persoon} = 36 \text{ kWh/d per persoon.}$$

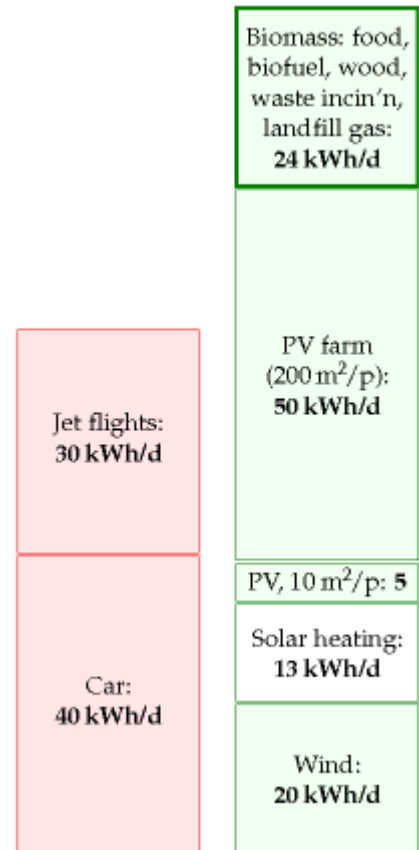
Wow, dat is niet te veel, gezien de extreem genereuze veronderstellingen die we erin gooiden om het hoogst mogelijke getal te krijgen. Als je biobrandstof voor auto's of vliegtuigen maakt van groen, zijn alle andere stappen in de keten van akker tot bougie onvermijdelijk inefficiënt. Ik denk dat het erg optimistisch zou zijn te hopen dat de gecumuleerde verwerkingsverliezen in de procesketen slechts 33% bedragen. Zelfs bij het verbranden van graan in een kwaliteitsbrander gaat 20% van

de energie verloren in de schoorsteen. Daarom kan het totale potentieel van biomassa en biobrandstof zeker niet groter zijn dan 24 kWh/d per persoon. En vergeet niet dat we ook een deel van de gewassen willen gebruiken als voedsel voor onszelf en onze dierenvrienden.

Zou genetische manipulatie planten kunnen voortbrengen die zonne-energie efficiënter omzetten in chemicaliën? Het is denkbaar, maar ik heb geen wetenschappelijke publicatie gevonden waarin installaties in Europa worden voorspeld die een energieproductie van meer dan 1 W/m² zouden kunnen opleveren.

Ik zet de 24 kWh/d per persoon op de groene hoop, maar benadruk dat ik denk dat dit overschat is - ik denk dat het werkelijke maximale vermogen dat met biomassa haalbaar is, kleiner zal zijn vanwege verliezen bij teelt en verwerking.

Fig.6.12: Biomassa op zonne-energie, inclusief alle vormen van biobrandstof, afvalverbranding en voedsel: 24 kWh/d per persoon.



Eén conclusie is duidelijk geworden: Biobrandstoffen kunnen geen significante bijdrage leveren - althans niet in landen als Engeland, en niet als vervanging voor het gebruik van transportbrandstoffen. Zelfs afgezien van de belangrijkste problemen van biobrandstoffen - dat de productie ervan concurreert met voedsel en dat de extra kosten van landbouw en verwerking vaak het grootste deel van de gewonnen energie opslokken (**fig.6.14**) - kunnen biobrandstoffen uit planten in een Europees land als Engeland zo weinig energie leveren dat zij naar mijn mening nauwelijks de moeite waard zijn om over te praten.

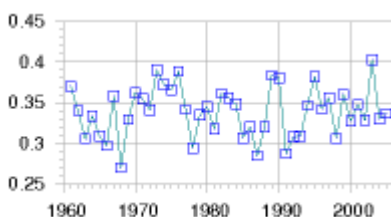


Fig.6.13: Zon in Cambridge: aantal uren zonneschijn gedurende het jaar, uitgedrukt als fractie van het totale aantal uren daglicht.

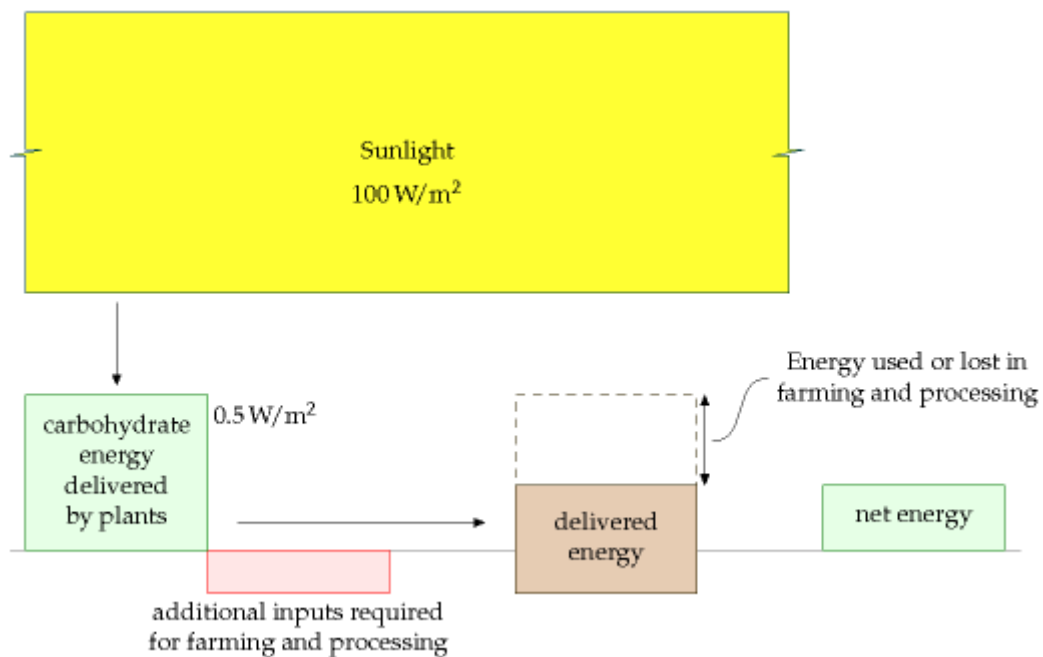


Fig.6.14: Illustratie van de kwantitatieve vraag die aan elke biobrandstof moet worden gesteld: Hoeveel extra energie is er nodig voor de teelt en de verwerking? Wat is de geleverde energie? Wat is de netto energie opbrengst? Vaak wordt een groot deel van de energie van de fabriek tenietgedaan door extra energie-input en verwerkingsverliezen.

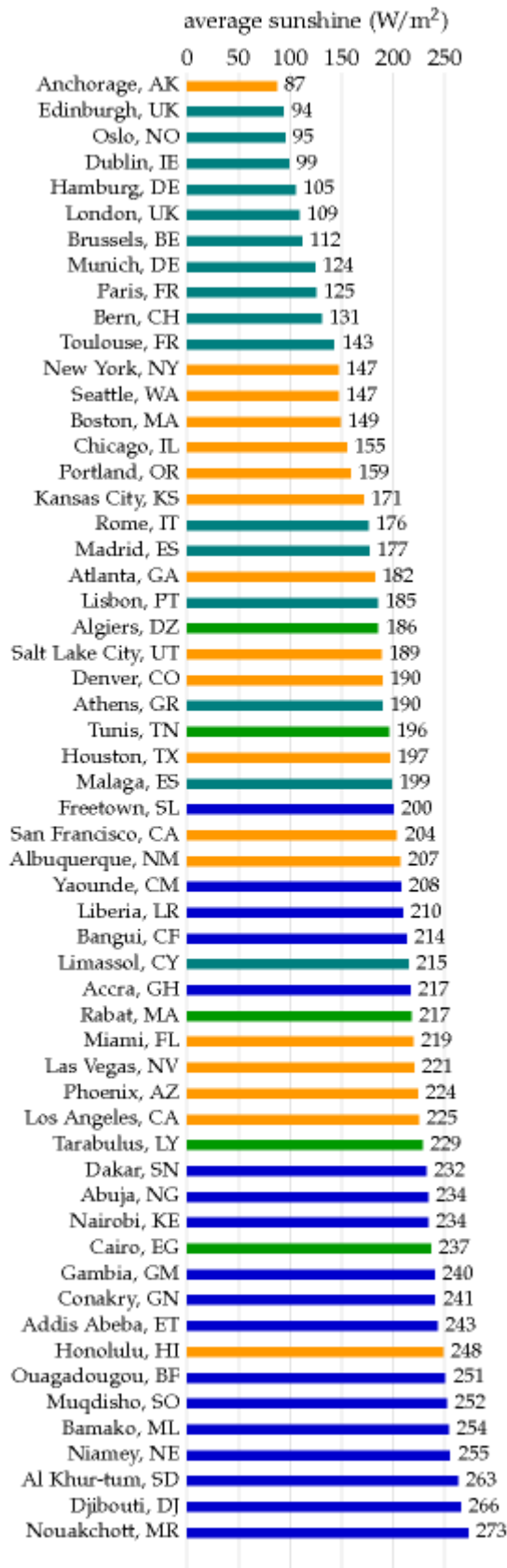


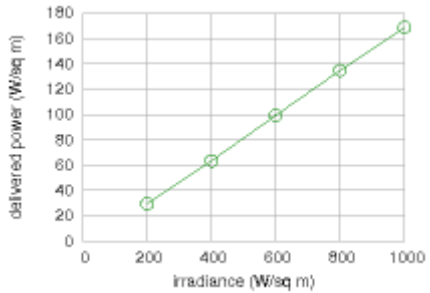
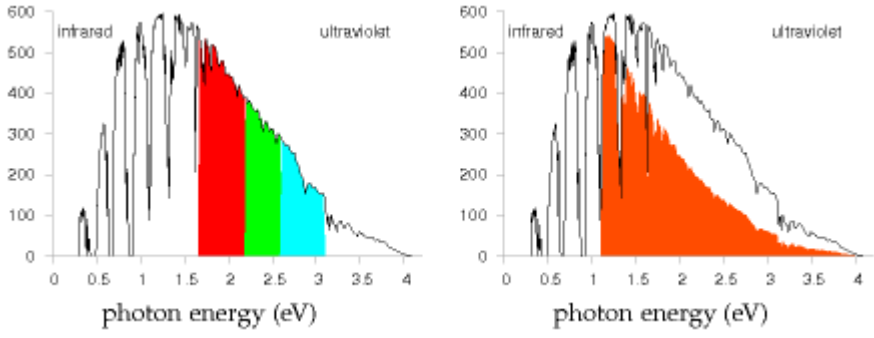
Fig.6.16: Gemiddeld vermogen van zonlicht op een horizontaal zonlicht op een horizontaal oppervlak op geselecteerde plaatsen in locaties in Europa, Noord-Amerika en Afrika.

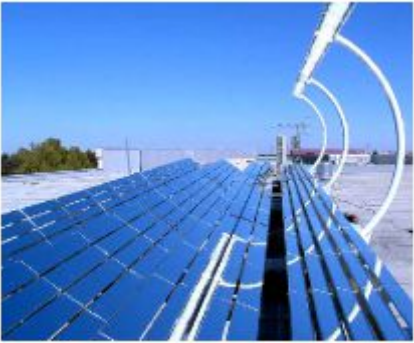


[051] Opmerkingen en referenties

Pagina																					
[042]	de helling tussen zonlicht en land: de breedtegraad van Cambridge is $\theta = 52^\circ$; de intensiteit van de middagzon vermenigvuldigd met $\cos \theta \approx 0,6$. De precieze factor hangt af van de tijd van het jaar en varieert tussen $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ en $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.																				
[042]	Op een gemiddelde plaats in Engeland schijnt de zon slechts ongeveer een derde van de daglichturen: De Highlands krijgen 1.100 h zon per jaar - een aandeel van 25%. De beste plekken in Schotland hebben 1.400 h per jaar - 32%. Cambridge: 1.500 ± 130 uur per jaar - 34%. De zuidkust van Engeland (het zonnigste deel van het VK): 1.700 uur per jaar - 39%. [2rqloc] gegevens voor Cambridge van [2szckw]. Zie ook Fig.6.16.																				
[042]	het gemiddelde natuurlijke zonlichtrendement op een vierkante meter dak op het zuiden in Engeland op ongeveer 110 W/m², en op een vlakke grond op ongeveer 100 W/m²: bron: NASA "Oppervlaktemeteorologie en Zonne-energie" [5hrxls]. Vindt u het ook vreemd dat er zo weinig verschil is tussen een zuidelijk dak en een plat dak? Dat was ik ook. Het verschil is eigenlijk maar 10% [6z9epq].																				
[043]	ongeveer 10 m² modules per persoon: ik heb de oppervlakte van daken op het zuiden als volgt geschat: Ik nam de oppervlakte bebouwd met gebouwen per persoon (48 m ² in Fig.6.16: Gemiddelde opbrengst van zonlicht op een horizontaal oppervlak op geselecteerde plaatsen in Europa, Noord-Amerika en Afrika. [052] Engeland, Tabel.I.6), waarvan $\frac{1}{4}$ het deel van de deelgebieden op het zuiden was, en vermeerderde dat met 40% wegens de dakhelling. Dit geeft 16 m ² per persoon. Aangezien modules meestal alleen in bepaalde rechthoekige afmetingen verkrijgbaar zijn, blijven er altijd onbedekte dakoppervlakken over, dus 10 m ² moduleoppervlak Q11 ¹¹ .																				
[044]	Het gemiddelde vermogen van een PV-module: Er doet een mythe de ronde dat PV-modules bij bewolkt weer bijna evenveel stroom produceren als wanneer de zon schijnt. Dit is gewoon niet waar. Op een heldere maar bewolkte dag zetten PV-modules en PV-systemen ook energie om, maar veel minder: de PV-productie daalt tot ongeveer een tiende wanneer de zon achter een wolk verdwijnt (omdat de intensiteit van het zonlicht tot $1/10$ daalt). Zoals uit Fig.6.15 blijkt, is de PV-opbrengst tamelijk evenredig met de stralingsintensiteit - althans wanneer de modules bij 25°C staan. Fig.6.18: Rendement van PV-modules die momenteel op de markt verkrijgbaar zijn. In de tekst wordt ervan uitgegaan dat PV-modules op daken 20% efficiënt zijn en PV-modules op de grond 10% efficiënt zijn. In gebieden met een zonnestraling van 100 W/m² leveren modules met een rendement van 20% 20 W/m². <table border="1"> <caption>Efficiency of PV technologies (approximate values from Fig.6.18)</caption> <thead> <tr> <th>Technology</th> <th>Efficiency (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>amorphous silicon</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>multi-crystalline silicon</td> <td>~18</td> </tr> <tr> <td>single crystal silicon</td> <td>~22</td> </tr> <tr> <td>Sunpower WHT</td> <td>~24</td> </tr> <tr> <td>Sanyo HIP</td> <td>~22</td> </tr> <tr> <td>Suntech poly-crystalline</td> <td>~18</td> </tr> <tr> <td>thin-film triple junction</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>Shockley-Queisser limit</td> <td>~33</td> </tr> <tr> <td>Triple-junction limit</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table>	Technology	Efficiency (%)	amorphous silicon	~10	multi-crystalline silicon	~18	single crystal silicon	~22	Sunpower WHT	~24	Sanyo HIP	~22	Suntech poly-crystalline	~18	thin-film triple junction	~10	Shockley-Queisser limit	~33	Triple-junction limit	50
Technology	Efficiency (%)																				
amorphous silicon	~10																				
multi-crystalline silicon	~18																				
single crystal silicon	~22																				
Sunpower WHT	~24																				
Sanyo HIP	~22																				
Suntech poly-crystalline	~18																				
thin-film triple junction	~10																				
Shockley-Queisser limit	~33																				
Triple-junction limit	50																				

¹¹)Q11 Met name de interactie met dakvensters, dakkapellen of onderlinge zonweringen vermindert deze verhouding tussen moduleoppervlak en dakoppervlak in de praktijk, zodat de vermindering van $6/16 = 37\%$ vrij gering is. is daarom vrij laag.

	Om de zaak nog ingewikkelder te maken, hangt het rendement ook af van de temperatuur - warmere modules hebben een lager rendement (typisch 0,38% verlies per °C) - maar wanneer men naar reële modulegegevens kijkt, b.v. op www-solarwarrior.com, kan men het belangrijkste punt bevestigen: Op een bewolkte dag is de output aanzienlijk lager dan wanneer het zonnig is. Dit punt wordt vaak verdoezeld door modulefabrikanten die beweren dat het rendement afhankelijk is van de zonneschijn. "De modules zijn bijzonder efficiënt in bewolkte omstandigheden," zeggen ze; dit kan waar zijn, maar efficiëntie moet niet worden verward met vermogen. Fig.6.15: Prestaties van een Sanyo HIP-210NK-HE1 module als functie van de lichtintensiteit (bij 25 °C, uitgaande van een uitgangsspanning van 40 V). Bron: datasheet www-sanyosolar.eu 
[044]	Typische fotonvoltaïsche modules hebben een rendement van 10%, zeer geavanceerde modules tot 20%: Zie Fig.6.18. Bronnen: Turkenburg (2000), Sunpower www-sunpowercorp.com, Sanyo www-sanyo-solar.eu, Suntech.
[044]	Een module met een rendement van 30% zou zeer opmerkelijk zijn. Dit citaat is van Hopfield en Gollub (1978), die schreven over modules met focuserende spiegellenzen. De theoretische limiet voor standaard "single-junction" modules zonder focussering is de Shockley-Queisser limiet.  Fig.6.17: Deel van Shockley en Queisser's verklaring voor de 31% rendementsbeperking van eenvoudige PV-modules. Links: Het spectrum van middagzonlicht. Op de verticale as staat de vermogensdichtheid in W/m^2 per eV spectraal interval. Het zichtbare gebied wordt aangegeven door de gekleurde achtergrond. Rechts is de ingesloten energie van een PV-halfgeleider met een enkele bandkloof van 1,1 eV weergegeven als een rood-geëts gebied. Fotonen met energieën onder de bandkloof gaan verloren. Een deel van de energie van fotonen boven de bandkloof gaat ook verloren; bij voorbeeld 50% van de energie van een foton van 2,2 eV. Verdere verliezen treden op door de onvermijdelijke straling van recombinerende ladingen in de halfgeleider. Daarin wordt gesteld dat ten hoogste 31% van de zonne-energie in elektriciteit kan worden omgezet (Shockley en Queisser, 1961). (De belangrijkste reden voor deze limiet is

	een eigenschap van het halfgeleidermateriaal voor fotonvoltatische cellen, de zogenaamde band-gap, die de energie van een optimaal omgezet [053] foton. Fotonen met lagere energieën worden helemaal niet gebruikt, fotonen daarboven kunnen worden opgevangen, maar hun energiefractie voorbij de BandGap gaat verloren). Scherpstelinrichtingen (lenzen of spiegels) kunnen de kosten (per watt) verlagen en de efficiëntie verhogen. De Shockley-Queisser-limiet voor modules met focussering is 41% rendement. De enige manier om de Shockley-Queisser limiet te overschrijden is het licht te splitsen in verschillende golflengtecomponenten en elke golflengtecomponent om te zetten met zijn eigen gematchte bandkloof. Deze aanpak wordt "multiple-junction" PV genoemd. Onlangs werd gemeld dat meervoudige-junctie modules met focussering een rendement van 40% hadden. [2tl7t6], www-spectrolab.com. Juli 2007, Universiteit van Delaware
[044]	Afb.6.5 Gegevens en foto met dank aan Jonathan Kimmitt.
[044]	Heliodynamica - www-hdsolar.com. Zie Fig.6.19. Arontis fabriceert een soortgelijk systeem www-arontis.se (404) Afb.6.19: Een gecombineerde warmtekrachtinstallatie op zonne-energie van Heliodynamics. Een reflectoroppervlak van 32 m² (iets groter dan de zijkant van een dubbeldekkerbus) levert tot 10 kW warmte en 1,5 kW elektriciteit. In een zonnig land zou één van deze apparaten, met een gewicht van ongeveer een ton, 60 kWh/d aan warmte en 9 kWh/d aan elektriciteit kunnen produceren. Dit komt overeen met gemiddelde fluxen (per vierkante meter oppervlak van het toestel) van 80 W/m² warmte en 12 W/m² elektriciteit. Deze fluxen zijn vergelijkbaar met die van standaard zonneverwarmingstoestellen en PV-modules, maar dit concept van Heliodynamics levert het vermogen tegen een lagere kostprijs omdat het grootste deel van het materiaal gewoon glas is. Ter vergelijking: de gemiddelde energievraag van een Europeaan: 125 kWh/d. 
[045]	het zonnepark van Mulhouse: dit zonnepark van 25 acre is ontworpen om 0,7 MW (17.000 kWh per dag) te leveren . Het metrostation Stillwater Avenue in New York heeft amorfe silicium dunne-film modules geïntegreerd in het dak, die 4W/m² leveren. De Nellis-zonne-energiecentrale in Nevada is in december 2007 voltooid. Naar verwachting zal het 30 GWh per jaar opwekken op 56 hectare, [054] wat neerkomt op 6W/m² [5hzs5y]. Serpa Solar Power Plant, Portugal (PV), "de grootste zonne-energiecentrale ter wereld" [39z5m5] [2uk8q8] heeft zonnepanelen op 60 hectare, d.w.z. 600.000 m² of 0,6 km², die naar verwachting 20 GWh per jaar zullen leveren, d.w.z. gemiddeld 2,3 MW. Dit is een vermogen per oppervlakte-eenheid van 3,8W/m².
[046]	De fotonvoltatische capaciteit die nodig is om de 50 kWh/d per persoon te leveren is meer dan 100 maal groter dan de huidige wereldwijd geïnstalleerde fotonvoltatische capaciteit: 125 GW gemiddeld vermogen of 1.250 GW geïnstalleerd piekvermogen is nodig om 50 kWh/d per Engelsman te leveren. Eind 2007 was er wereldwijd 10 GW aan pieklijnen geïnstalleerd, en het groeitempo bedraagt ongeveer 2 GW per jaar.
[046]	5% van Engeland bedekken met PV-panelen lijkt buiten alle plausibele grenzen: De belangrijkste reden om dit als ongeloofwaardig te beschouwen is het feit dat de En-

	gelsen hun land liever voor landbouw en recreatie gebruiken dan voor zonneparken. Verdere bezorgdheid wordt gewekt door de prijs. Dit is geen boek over economie, maar toch: op basis van de prijzen van de Beierse zonneparken zou de 50 kWh/d/p €91.000 per persoon kosten. Als de centrale 20 jaar zonder verdere kosten draait, bedragen de productiekosten 0,25 €/kWh. Verdere lectuur: David Carlson, BP solar [2ahecp].
[048]	In Engeland gooien mensen ongeveer 300 g voedsel per persoon per dag weg: Bron: Ventour (2008).
[048]	Fig.6.10: In de VS is het mogelijk om zonder nitraatbemesting 24 ton droge stof per jaar te produceren uit miscanthus. In Engeland worden oogsten van ongeveer 12-16 ton/ha per jaar gemeld. Droge miscanthus heeft een calorische waarde van 17 MJ/kg, zodat het Engelse gewas overeenkomt met een vermogensdichtheid van 0,75 W/m². Bron: Heaton et al. (2004) en [6kqq77]. De veronderstelde oogst wordt pas na drie jaar ongestoorde groei bereikt.
[048]	De meest efficiënte planten in Europa zijn ongeveer 2% efficiënt: bij lage lichtintensiteiten zijn de beste Britse planten 2,4% efficiënt op een goed bemeste bodem (Monteith, 1977), maar de efficiëntie daalt bij hogere lichtintensiteiten. Volgens Turkenburg (2000) en Schiermeier et al. (2008) bedraagt het rendement bij biomassa op zonne-energie minder dan 1%. Hier zijn enkele bronnen om mijn schatting van 0,5 W/m² voor het vermogen van energiegewassen in Engeland te controleren: de Royal Commission on Environmental Pollution schat de haalbare vermogensdichtheid van energiegewassen in Engeland op 0,2 W/m² (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). Op bladzijde 43 van het document over biobrandstoffen van de Royal Society (Royal Society working group on biofuels, 2008) staat Miscanthus hoog op de lijst, met een chemisch vermogen van ongeveer 0,8 W/m². In de World Energy Assessment, gepubliceerd door UNDP, schrijft Rogner (2000): "Uitgaande van een omzettingsefficiëntie van 45% en oogsten van 15 ton ovengedroogd materiaal per ha per jaar, is er 2 km² veld nodig per megawatt (elektrisch) geïnstalleerd vermogen dat 4000 uur per jaar in bedrijf is". Dit geeft een vermogen per oppervlakte-eenheid van 0,23 W(el)/m². (1W(el) betekent 1 watt elektrisch vermogen). Energy for Sustainable Development Ltd (2003) schat dat snelgroeiende houtgewassen meer dan 10 ton droog hout per ha per jaar kunnen produceren, wat overeenkomt met een vermogensdichtheid van 0,57 W/m². (Droog hout heeft een calorische waarde van 5 kWh per kg). Volgens Archer en Barber (2004) kan het onmiddellijke rendement van een gezonde loofboom in optimale omstandigheden 5% bereiken, maar na verloop van tijd bedraagt het energieopslagrendement van moderne planten 0,5-1%. Archer en Barber denken dat het mogelijk is de opslagefficiëntie van planten te verbeteren door genetische modificatie, met name C4-planten, die - 55 - van nature al een bijzonder efficiënt fotosyntheseproces hebben. C4-planten leven hoofdzakelijk in de tropen en vereisen hoge temperaturen, zij groeien niet bij temperaturen onder 10°C. Voorbeelden van C4-planten zijn suikerriet, maïs, sorghum, vingergierst en switchgrass. Zhu et al. (2008) berekenden de theoretische limiet voor de omzettingsefficiëntie op 4,6% voor C3-fotosynthese en 6% voor C4-fotosynthese. De hoogste in de praktijk bereikte rendementen zouden 2,4% en 3,7% bedragen voor respectievelijk C3 en C4, en volgens Boyer (1982) zijn de in de VS bereikte gemiddelde waarden 3 tot 4 maal kleiner dan deze recordwaarden (wat neerkomt op ongeveer 1% efficiëntie). Een van de redenen waarom planten de theoretische limiet niet halen, is dat zij niet genoeg capaciteit hebben om al het invallende zonlicht volledig te benutten. Beide artikelen (Zhu et al., 2008; Boyer, 1982) bespreken suggesties voor genetische manipulatie van efficiëntere planten.

[048]	Fig.6.11. De gegevens zijn afkomstig van Rogner (2000) (netto-energieopbrengst van hout, koolzaad, suikerriet, tropische plantages); Bayer Crop Science (2003) (koolzaad tot biodiesel); Francis et al. (2005) en Asselbergs et al. (2006) (jatropha); Mabee et al. (2006) (suikerriet, Brazilië); Schmer et al. (2008) (switchgrass, marginaal akkerland in de VS); Shapouri et al. (1995) (maïs tot ethanol); Royal Commission on Environmental Pollution (2004); Royal Society working group on biofuels (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer and Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).
[049]	Bij het verbranden van graan in een brander van hoge kwaliteit gaat 20% van de energie verloren via de schoorsteen: bronnen: Werkgroep biobrandstoffen van de Royal Society (2008); Royal Commission on Environmental Pollution (2004).

7 verwarming

Verwarming en koelen

Verwarming en koeling

In dit hoofdstuk wordt nagegaan hoeveel energie we gebruiken om de temperatuur van onze omgeving te regelen - thuis en op het werk - en om eten, drinken, de was of de vaat te verwarmen of af te koelen.



Fig.7.1: Een haard van nieuwe huizen

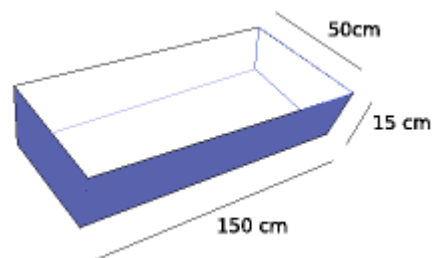


Fig.7.2: Water in een badkuip

Sanitair warm water

De grootste hoeveelheid warm water in huis wordt waarschijnlijk verbruikt bij het baden, douchen, afwassen of de was doen - het hangt allemaal af van de persoonlijke levensstijl. Laten we eerst het energieverbruik van een warm bad schatten:

Stel het volume van een badkuip is 50 cm x 15 cm x 150 cm $\approx$ 110 liter. Laat de watertemperatuur 50°C zijn en laat het water bij 10°C het huis binnenkomen. De warmtecapaciteit van water, die aangeeft hoeveel energie nodig is om het te verwarmen, bedraagt 4.200 J per liter per °C. Dus de energie die nodig is om dit water 40°C op te warmen is:

$$4200 \text{ J/l/}^\circ\text{C} \times 110 \text{ l} \times 40 \text{ }^\circ\text{C} \approx 18 \text{ MJ} \approx 5 \text{ kWh.}$$

Dus een bad nemen verbruikt 5 kWh. Ter vergelijking: voor het nemen van een douche (met 30 liter) is ongeveer 1,4 kWh nodig.

Waterkokers en fornuizen

Engeland, als een beschaafd land, heeft een huishoudelijke elektriciteitsvoorziening van 230 volt. Hierop kunnen elektrische waterkokers worden aangesloten om in een paar minuten één tot twee liter water te koken. Hun vermogen is 3 kW. Waarom 3

kW? Dit is namelijk het hoogste vermogen dat een 230 V stopcontact kan leveren zonder de toegestane 13 A te overschrijden. In landen met een 110 V-net duurt het twee keer zo lang om een kopje thee te zetten.

Als een huishouden de waterkoker 20 minuten per dag gebruikt, is dat een gemiddeld stroomverbruik van 1kWh per dag (ik schat het volgende "per huishouden" en ga uit van 2 personen per huishouden).

Een kleine plaat van een elektrisch fornuis heeft hetzelfde vermogen als een broodrooster: 1 kW. Snelkookplaten zijn 2,3 kW. Als 2 kookplaten gedurende een half uur per dag op vol vermogen worden gebruikt, is dat 1,6 kWh per dag.

[057] Bij een magnetron staat het vermogen meestal op de voorkant: op de mijne staat 900 W, maar in werkelijkheid verbruikt hij 1,4 kW. Als u de magnetron 20 minuten per dag gebruikt, is dat 0,5 kWh per dag.

De frituurpan verbruikt meer: ongeveer 3 kW op vol vermogen. Als u de oven één uur per dag gebruikt, en hij staat de helft van die tijd op vol vermogen, dan is dat 1,5 kWh per dag.

Apparaat	Vermogen	Tijd per dag	Energie per dag
Koken:			
-waterkoker	3 kW	1/3 h	1,0 kWh/d
-magnetron	1,4 kW	1/3 h	0,5 kWh/d
-elektrisch fornuis	3,3 kW	1/2 h	1,6 kWh/d
-elektrische oven	3 kW	1/2 h	1,5 kWh/d
Wasserij:			
-wasmachine	2,5 kW		1 kWh/d
-wasdroger	2,5 kW	0,8 h	2 kWh/d
-droogkast	0,5 kW		
-waslijn	0 kW		
-vaatwasser	2,5 kW		1,5 kWh/d
Koeling:			
-koelkast	0,02 kW	24 h	0,5 kWh/d
-vriezer	0,09 kW	24 h	2,3 kWh/d
-airconditioning	0,6 kW	1 h	0,6 kWh/d

Tabel 7.4: Energieverbruikswaarden voor verwarmings- en koeltoestellen, per huishouden

hete was en hete vaat

Wasmachines, vaatwassers of droogtrommels verbruiken allemaal ongeveer 2,5 kW wanneer ze draaien. Een wasmachine gebruikt ongeveer 80 liter water per lading, en de energiekosten bedragen ongeveer 1 kWh bij een temperatuurinstelling van 40°C. Als u de was ophangt in een droogkast Q12¹² in plaats van de droogtrommel te gebruiken, is ook warmte nodig om het water te verdampen - maar slechts ongeveer 1,5 kWh per lading, in plaats van 3 kWh.

[058] Als we alle schattingen met betrekking tot warm water bij elkaar optellen, komen we uit op 12 kWh per dag per persoon.

Fig.7.5: De totale hoeveelheid warm water thuis en op het werk - inclusief baden, douchen, wassen, koken, afwassen - is goed voor ongeveer 12 kWh/d/p. Dit vak is niet gearceerd om aan te geven dat het om thermische energie op laag niveau gaat.

Hot water:
12 kWh/d

Hete lucht - thuis en op het werk

Hebben we meer energie nodig om warm water en warm eten te leveren of om de lucht binnenshuis via radiatoren te verwarmen? Een goede manier om de energie te schat-

Microwave:
1400 W peak

Fridge-freezer:
100 W peak,
18 W average



energie
te schat-

verwarming vo
zijn, zijn in En



Fig.7.6: Elektrische kachel 2kW

© <http://www.withouthotair.com/>

Afb.7.3: een verwarmings- en een koelapparaat

ten die elke dag nodig is voor warme lucht, is te kijken naar elektrische kachels, omdat we beter bekend zijn met hun vermogen. Het vermogen van een kleine ventilatorkachel is 1 kW (24 kWh per dag). In de winter heb je er één per persoon nodig om niet te bevriezen, in de zomer geen.

Gemiddeld zou dat 12 kWh per dag zijn, en dat is absoluut noodzakelijk.

Maar de meeste mensen gebruiken meer dan absoluut noodzakelijk is en houden verschillende kamers tegelijk warm (keuken, woonkamer, hal, badkamer, bijvoorbeeld). Een aannemelijk huisnummer voor de productie van warme lucht zou dus ongeveer het dubbele zijn: 24 kWh per dag per persoon.

Bijlage E, die bij dit hoofdstuk hoort, bevat een meer gedetailleerde beschouwing van warmtestromen in gebouwen. Met dit model kunnen voorspellingen worden gedaan over het energiebesparingspotentieel van verschillende maatregelen, zoals verlaging van de kamertemperatuur bij de thermostaat, dubbele beglazing, enzovoort.

Buitenverwarming en andere luxe

Er is een groeiende trend van verwarmingsschermen die ook de buitenlucht verwarmen. Deze hebben een typisch vermogen van 15 kW. Gebruik deze een paar uur 's avonds en dat is een extra 30 kWh per dag.

Een meer bescheiden luxe is een verwarmd dekbed. Voor een tweepersoonsbed is dat 140 W; een uur lang aanzetten en dat is 0,14 kWh.

Fig.7.7: (links) Totale hoeveelheid warme lucht - inclusief huishoudelijke en professionele verwarming - ongeveer 24 kWh/d/p.



Hot air:
24 kWh/d

Koeling en diepvriezers

Wij regelen niet alleen de temperatuur van het warme water en de warme lucht waarmee wij ons omringen, maar ook de koelkasten die wij in onze warme huizen proppen. Mijn koel-vriescombinatie, afgebeeld in **Fig.7.3**, verbruikt gemiddeld 18 W, of ruwweg 0,5 kWh/d.

Airconditioning

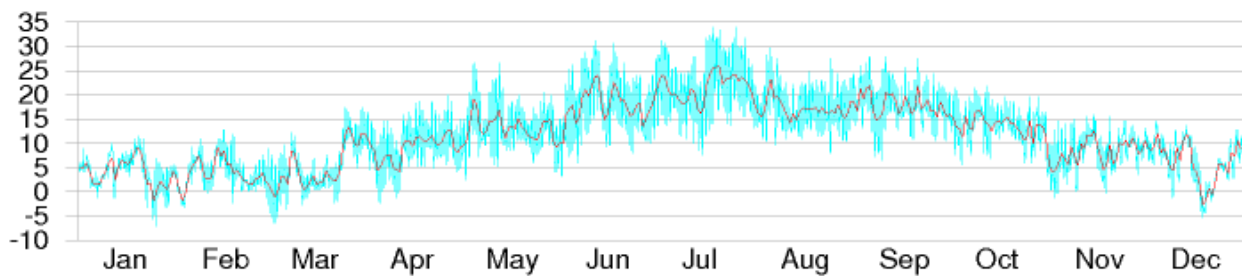


Fig.7.8: *Temperatuur in Cambridge, in °C, dagelijks (rood) en halfuurlijks (blauw) over 2006.*

In landen waar de buitentemperatuur boven de 30°C stijgt, wordt airconditioning als een noodzaak beschouwd, en de energiekosten van deze temperatuurregeling kunnen vrij hoog oplopen. Dit boek gaat echter over omstandigheden in Engeland, waar de temperatuur zelden een behoefte aan airconditioning oplevert (**Fig.7.8**).

[059] Een zuinige vorm van airconditioning is een luchtwarmtepomp. Een op het raam gemonteerde elektrische unit voor één kamer heeft 0,6 kW elektriciteit nodig en levert 2,6 kW koeling aan de warmtewisselaar. Om een verbruikswaarde voor Engeland te schatten, ga ik ervan uit dat het systeem gedurende 12 uur op elk van de 30 dagen van het jaar in bedrijf is. Op de dagen dat hij in bedrijf is, verbruikt hij 7,2 kWh, gemiddeld over het jaar 0,6 kWh/d.

De in dit hoofdstuk gemaakte raming van de energiekosten voor koeling - 12kWh/d per persoon - omvat airconditioners en huishoudelijke koelkasten. Voedsel op weg van het veld naar de boodschappenmand wordt ook vaak gekoeld. De energiekosten van de voedselketen komen echter later, in [hoofdstuk 15](#), aan de orde.

fig.7.9: *(midden) Koeling in totaal, inclusief koelkast (koel-vries-combinatie) en enige airconditioning in de zomer – 1 kWh/d.*

Cooling: 1 kWh/d

Totale vraag naar verwarming en koeling

Onze ruwe schatting van de totale energie die nodig is voor verwarming en koeling (inclusief huis, werkplek, koken) geeft ons 37 kWh/d per persoon (12 voor warm water, 24 voor hete lucht, 1 voor koeling).

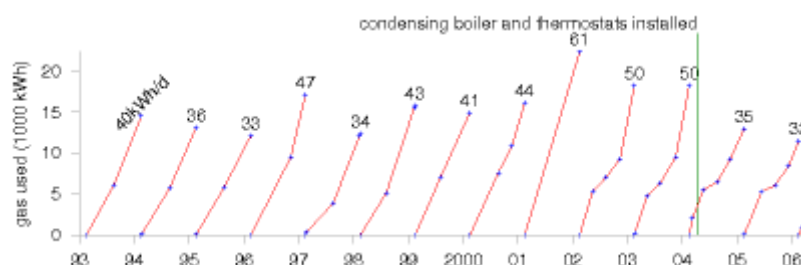


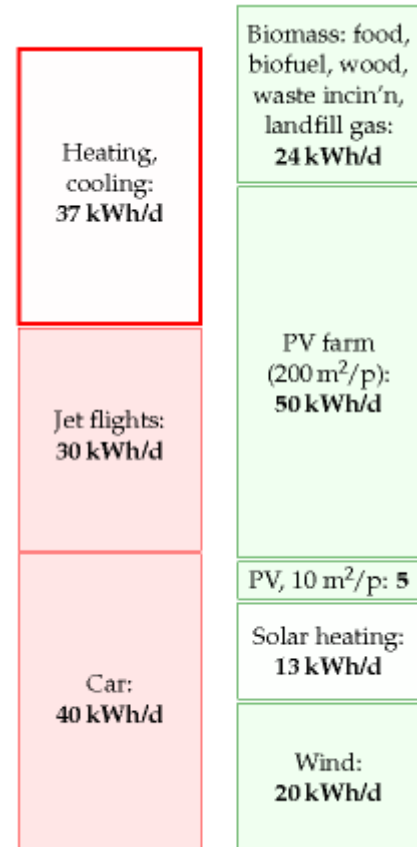
fig.7.10: mijn huishoudelijk gasverbruik cumulatief, elk jaar van 1993 tot 2005, in kWh. Het getal bovenaan de jaarlijnen is het gemiddelde verbruik, in kWh per dag. Als je wilt weten wat er in 2007 gebeurde, lees dan verder!

Ik controleer of deze schatting van de juiste orde van grootte is door te kijken naar mijn particuliere gasverbruik, dat - gemiddeld over 12 jaar - 40 kWh per dag bedraagt (fig.7.10). In die tijd dacht ik dat ik een behoorlijk zuinige kachel was.

[060] gebruiker, maar ik gaf weinig om mijn huidige energieverbruik. Hoofdstuk 21 laat zien hoeveel energie ik bespaarde nadat ik begon op te letten.

Aangezien verwarming een groot deel van het verbruik uitmaakt, vergelijk ik het met de nationale statistieken. Het Engels gemiddelde van huishoudelijk verbruik voor verwarming, water en koken bedroeg in 2000 21 kWh per dag per persoon, en het verbruik in de dienstensector voor verwarming, koeling, catering en warm water bedroeg 8,5 kWh/d/p.

Fig.7.11: (rechts) verwarming en koeling, ongeveer 37 eenheden. Ik heb de achtergrondkleur van dit vakje verwijderd om aan te geven dat het gaat om vermogen dat kan worden geleverd door thermische energie op laag niveau



We maken een schatting van de verwarming van de werkplek aan de hand van de gasrekening van de universiteit van Cambridge van 2006-7 en komen uit op 16 kWh/d per werknemer. Als we deze getallen bij elkaar optellen, krijgen we $21 + 8,5 + 16 \approx 45$ kWh/d, als we de universiteit van Cambridge als de gemiddelde werkplek beschouwen. Goed, dit komt voldoende overeen met onze oorspronkelijke raming van 37 kWh/d.

Opmerkingen en referenties

Pagina	
[057]	De frituurpan heeft meer nodig: ongeveer 3 kW: Er is duidelijk een breed scala. Veel braadpannen hebben een maximaal vermogen van 1,8 tot 2,2 kW. Topovens gaan tot 6 kW. Het Whirlpool AGB 487/WP 4-pits elektrisch fornuis heeft bijvoorbeeld een braadbuis van 5,9 kW en vier kookplaten van 2,3 kW. www-kcmltd.com/electricovenfornuizen.shtml, www-1stforkitchens.co.uk/kitchenovens.html
[057]	Een drogetrommel...verbruikt...ongeveer 1,5 kWh per lading: Ik heb dit berekend door mijn kleren te wegen: een lading wasgoed van 4 kg droog woog 2,2 kg meer nadat het uit mijn Bosch wasmachine was gehaald (zelfs na centrifugeren). De verdampingswarmte-energie van het water bij 15 graden is ongeveer 2.500 kJ/kg. Om om te rekenen naar een dagverbruik, ging ik ervan uit dat een persoon om de 3 dagen een was zou doen, en dat drogen in de wintermaanden kostbare warmte aan het huis onttrekt. (In de zomer zorgt de droogkast voor een klein klimaatregelend effect omdat het verdampen de water het huis afkoelt).
[060]	Het Engelse gemiddelde van het huishoudelijk verbruik was 21 kWh/d/p, en het verbruik in de dienstensector was 8,5 kWh/d/p: bron: Dept. of Trade and Industry (2002a).
[060]	De gasrekening van de universiteit van Cambridge van 2006-7 geeft 16 kWh/d per werknemer: Het gas- en oliegebruik van de universiteit van Cambridge (exclusief collegekamers) bedroeg 76 GWh. Ik definieer de universiteit als een werkplek voor 13.300 mensen (8602 vaste personeelsleden en 4667 post-docs). Het elektriciteitsverbruik bedroeg overigens 99,5 GWh. Bron: verslag van de universitaire nutsbedrijven.

8 waterkracht

Waterkracht

Om elektriciteit op te wekken uit waterkracht, heb je hoogte en regen nodig. Laten we de totale energie schatten voor alle regen die naar de zeespiegel stroomt. Voor deze raming verdeel ik Engeland in twee regio's: de lager gelegen, drogere gebieden die de "Lowlands" worden genoemd en de hoger gelegen gebieden met veel neerslag die de "Highlands" worden genoemd. Ik heb Bedford en Kinlochewe gekozen om de twee regio's te vertegenwoordigen.



Fig.8.1: Nanty-Moch Dam, onderdeel van een 55 MW hydro-elektrisch plan in Wales. Foto door Dave Newbould www-origins-photography.co.uk



Erratum 'K' 60 km noordelijker

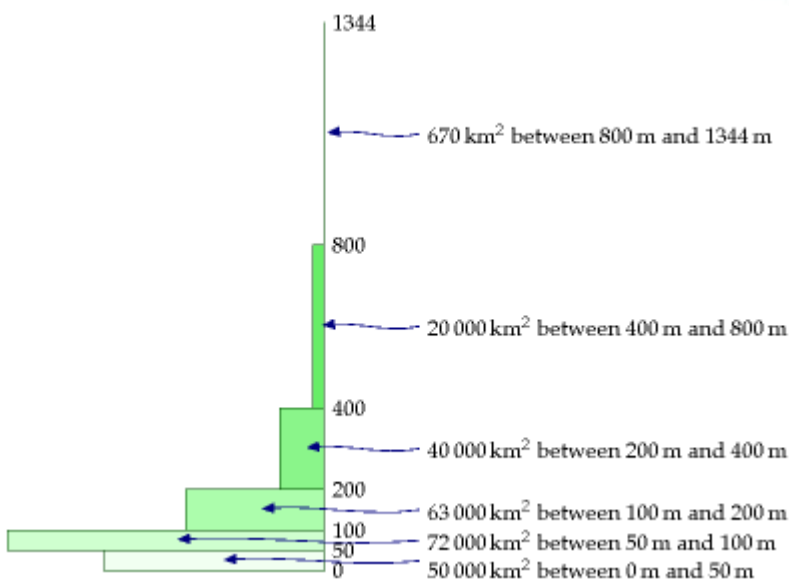


Fig.8.2: Landhoogtes in Engeland. De rechthoeken laten zien hoeveel land er op elke hoogte ligt.

Laten we eerst de "Lage Landen" bekijken. Om het gravitatievermogen van Lowlands-regen te bepalen, vermenigvuldigen we de neerslag van Bedford (584 mm per jaar) met de dichtheid van water (1000 kg/m^3), de aantrekkingskracht van de aarde ($g = 10 \text{ m/s}^2$), en de typische hoogte van de "Lowlands" boven de zeespiegel, zeg 100 m. Dus per oppervlakte-eenheid krijgen we $0,02 \text{ W/m}^2$. Dat is de kracht per oppervlakte-eenheid waarop regen valt.

Als we dat vergelijken met de oppervlakte per persoon (2.700 m^2 als de "Lowlands" gelijkelijk verdeeld zijn over alle 60 miljoen Engelsen), krijgen we een gemiddeld vermogen van ongeveer 1 kWh per dag per persoon. Dit is de absolute bovengrens voor waterkracht als elke rivier zou worden afgedamd en elke druppel zou worden benut.

[062] Realistisch gezien zouden we natuurlijk alleen rivieren afdammen met voldoende hoogteverschil waarvan het stroomgebied veel kleiner is dan het totale landoppervlak. Een groot deel van het water verdampt voordat het een turbine bereikt, en geen enkele waterkrachtcentrale kan alle potentiële energie van het water omzetten. Dat stelt strikte grenzen aan hydro-elektrische energie in de "Lowlands". Mensen kunnen graag waterraderen laten draaien en kleinschalige energiecentrales bouwen, maar dergelijke systemen zullen nooit meer dan 1 kWh per dag per persoon kunnen leveren.

Laten we nu de "Highlands" bekijken. Kinlochewe is een regenachtige plek: 2.278 mm per jaar, vier keer zoveel als Bedford. De hoogte is hier ook groter - grote delen liggen boven de 300 m . In totaal resulteert dit in twaalf maal het vermogen per vierkante meter, of $0,24 \text{ W/m}^2$. Als we de "Highlands" waterkracht royaal verdelen over alle Engelsen (bij 1.300 m^2 per persoon), geeft dit een bovengrens van 7 kWh per dag per persoon, zoals in de "Lowland" beschouwing, wederom zonder rekening te houden met verdamping en verliezen.

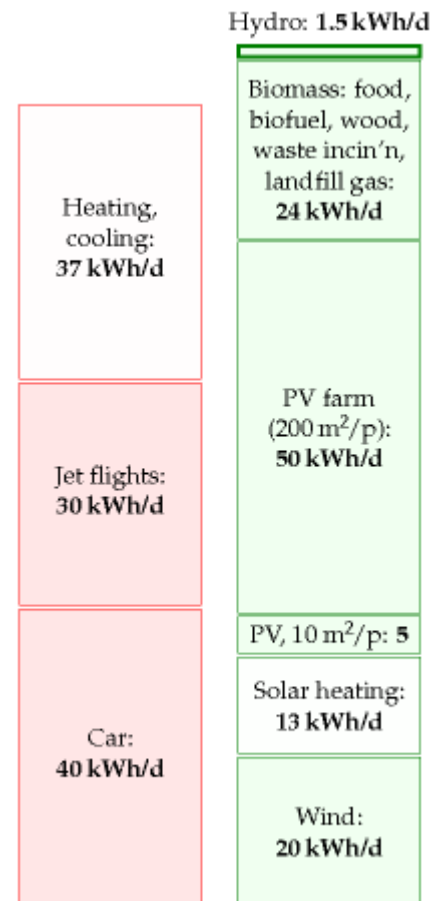


Fig.8.3: Elektriciteit uit waterkracht



Fig.8.4: Een waterrad van 60 kW

Wat is volgens ons de aannemelijke praktische grens? Laten we 20% daarvan nemen - 1,4 kWh/d en het naar boven afronden, want ja, zelfs in de "Lowlands" is enige hoeveelheid mogelijk: 1,5 kWh per dag per persoon.

Momenteel wordt in Engeland per persoon 0,2 kWh/d waterkracht gebruikt, d.w.z. dat er een verzeenvoudiging van de opwekkingscapaciteit nodig zou zijn om deze 1,5 kWh/d/p te realiseren.

[063] Opmerkingen en referenties

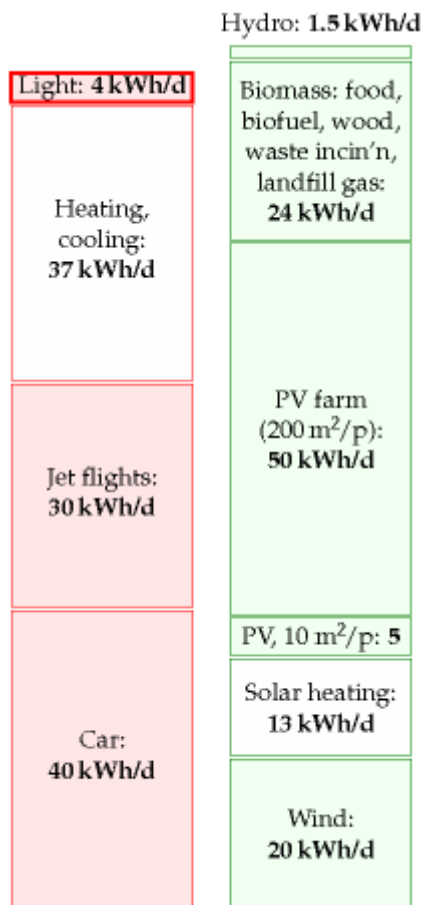
Pagina	
[061]	Regen statistieken van BBC Weercentrum
[062]	twaalf keer het vermogen per vierkante meter, d.w.z. bij 0,24 W/m² : dit kan worden geverifieerd aan de hand van de huidige vermogensdichtheden van de waterkrachtcentrale van Loch Sloy (Ross, 2008). Het stroomgebied van Loch Sloy is ongeveer 83 km ² , de neerslag bedraagt hier ongeveer 2.900 mm per jaar (iets meer dan de 2.278 mm/j van Kinlochewe); en de elektriciteitsproductie bedroeg in 2006 142 GWh per jaar, wat overeenkomt met een vermogensdichtheid van 0,2 W per m ² stroomgebied. Loch Sloy heeft een wateroppervlak van ongeveer 1,5 km ² , zodat de waterkrachtcentrale produceert bij een vermogensdichtheid per eenheid zeeoppervlak van 11 W/m ² . De hellingen, aquaducten en tunnels die het water in Loch Sloy brengen, werken dus als een 55-voudige krachtversterker.
[062]	Momenteel wordt in Engeland per persoon 0,2 kWh/d waterkracht gebruikt Bron: MacLeay et al. (2007). In 2006 hebben grote waterkrachtcentrales in totaal 3.515 GWh opgewekt (opwekkingscapaciteit 1,37 GW); kleine waterkrachtcentrales 212 GWh (0,01 kWh/d/p) (capaciteit 153 MW). In 1943, toen de bouw van waterkrachtcentrales in volle gang was, schatten ingenieurs van de North of Scotland Hydroelectricity Board dat de Schotse Hooglanden 6,3 TWh per jaar zouden kunnen produceren uit 102 centrales - dat zou 0,3 kWh/d per persoon in Engeland zijn (Ross, 2008). Glendoe, Englands eerste nieuwe grootschalige waterkrachtproject sinds 1957, zal 100 MW aan capaciteit toevoegen en zal 180 GWh per jaar kunnen leveren. Het stroomgebied van Glendoe beslaat 75 km ² , dus de vermogensdichtheid komt uit op 0,27 W per m ² stroomgebied. Glendoe moet "groot genoeg zijn om Glasgow te bevoorraden". Als we echter de 180 GWh per jaar verdelen over de 616 000 inwoners van Glasgow, krijgen we slechts 0,8 kWh/d per persoon. Dat is slechts 5% van de gemiddelde kWh/d aan energie die per persoon nodig is. Deze 20-voudige overdrijving is het gevolg van het feit dat wordt gekeken naar de piekoutput van Glendoe in plaats van naar het 5-maal kleinere gemiddelde en dat wordt gesproken over huishoudens in plaats van over het totale verbruik (zie blz. 346).

9 verlichting

Verlichting

Kamerverlichting

De helderste gloeilampen in woningen hebben een vermogen van 250 W, en bedlampjes hebben een vermogen van 40 W. In een ouderwetse gloeilamp wordt het grootste deel van deze energie omgezet in warmte in plaats van licht. Een TL-buis kan dezelfde hoeveelheid licht produceren met een kwart van het vermogen. Hoeveel vermogen heeft een modaal gefortuneerd persoon nodig voor zijn verlichtingsapparatuur? Mijn ruwe schatting, gebaseerd op **Tabel.9.2**, is dat een gemiddeld huishouden van twee personen met een mix van energiezuinige en energiezuinige verlichtingsarmaturen ongeveer 5,5 kWh per dag verbruikt, of 2,7 kWh/d/p. Ik ga er verder van uit dat iedereen op zijn werkplek een vergelijkbare verlichting heeft als zijn collega's; ervan uitgaande dat iedereen op het werk 1,3 kWh/d verbruikt, komen we uit op 4 kWh/d per persoon.



Apparaat	Vermogen	Tijd per dag	Energie per dag per huishouden
10 gloeilampen	1 kW	5 h	5 kWh
10 spaarlampen	0,1 kW	5 h	0,5 kWh

Tabel.9.2: Elektriciteitsverbruik voor huishoudelijke verlichting. Een aannemelijk totaal is 5,5 kWh per huishouden per dag; een vergelijkbaar cijfer voor de werkplek; misschien 4 kWh per dag per persoon.

Straatverlichting en verkeerslichten

Moeten wij openbare verlichting toevoegen om een adequate raming te krijgen, of domineert de ruimteverlichting het verlichtingsbudget? Straatverlichting verbruikt in feite 0,1 kWh/d/p, en verkeerslichten slechts 0,005 kWh/d/p - beide te verwaarlozen in vergelijking met kamerverlichting thuis en op het werk.

Fig.9.1: (links) Verlichting - 4 kWh per dag per persoon

[065] Hoe zit het met andere openbare verlichting, zoals bijvoorbeeld verkeers- en

informatieborden? Er zijn er minder van dan verkeerslichten, en deze waren ver beneden onze radar. We hoeven onze algemene schatting van 4 kWh/d per persoon dus niet te wijzigen.



Fig.9.4: Philips 11W naast Omicron 1,3W LED

Fig.9.3: Cumulatieve totale kosten van een traditionele gloeilamp van 100W (3 uur per dag) vergeleken met een energiebesparende lamp van het type Osram Dulux Longlife. Veronderstellingen: Elektriciteit kostte 10 pence per kWh, gloeilamp traditioneel 45 cent, spaarlamp 9 euro. (Ik weet dat je het goedkoper kunt vinden, maar uit de grafiek blijkt dat het zelfs voor deze prijs aanzienlijk zuiniger is).

Koplampen in het verkeer

In sommige landen is het verplicht om ook overdag de koplampen aan te doen. Hoeveel extra vermogen is daarvoor nodig, vergeleken met het vermogen dat sowieso nodig is voor het rijden zelf? Laten we zeggen dat de auto een totaal van 100 W heeft met zijn vier lampen. Hun vermogen wordt opgewekt door een 25% efficiënte motor die een 55% efficiënte dynamo aandrijft, dus verbruiken ze 730 W. Ter vergelijking: een doorsnee-auto die 50 km/h rijdt en 8,5 l/100km brandstof verbruikt, heeft gemiddeld 42.000 W nodig. De extra verlichting vergt dus 2% extra stroom.

Hoe zit het met toekomstige elektrische auto's? Deze hebben meestal 5.000 W nodig. Een extra 100 W voor verlichting voegt ook 2% toe. Het stroomverbruik zou lager zijn als we overschakelen op LED, maar als we er nog meer aandacht aan besteden, krijgen we al snel een ernstig geval van "elke kleine stap telt" eritis.

De economische aspecten van spaarlampen

Over het algemeen ga ik niet in op de economie, maar voor gloeilampen maak ik

graag een uitzondering. Osram beweert dat zijn 20W spaarlamp dezelfde lichtopbrengst heeft als een 100W gloeilamp. Bovendien zou de levensduur 15.000 uur bedragen (of "12 jaar" bij 3 uur per dag). De gemiddelde gloeilamp gaat daarentegen slechts 1.000 uur mee. Binnen een periode van 12 jaar heeft men dus de keuze tussen 15 gloeilampen en 1500 kWh elektriciteit (kosten ongeveer 150€) of één spaarlamp en 300 kWh elektriciteit (kosten ongeveer 30€).

Moet ik wachten tot de oude lamp kapot gaat voordat ik hem verwissel? Het voelt als verspilling, nietwaar? Iemand heeft middelen gestoken in het maken van de gloeilamp; moeten we die investering niet terugverdienen door de lamp te gebruiken tot hij op is? Maar het economische antwoord is duidelijk: een oude gloeilamp blijven gebruiken is goed geld naar kwaad geld sturen. Als u een bevredigende spaarlamp vindt, moet u een oude gloeilamp onmiddellijk door een dergelijke lamp vervangen.

Hoe zit het met het kwik in spaarlampen? Zijn LED's beter dan halogeenlampen? Onderzoekers zeggen dat leds binnenkort energie-efficiënter zullen zijn dan compacte halogeenlampen. Het rendement van een lamp wordt gemeten in lumen per watt. Ik heb de cijfers van mijn recente aankopen vergeleken: De helderheid van een Philips Genie 11W halogeenlamp (fig.9.4) is 600 lumen, een efficiëntie van 55 lumen per watt; gloeilampen leveren 10 lumen per watt; de Omicron 1,3W, die is samengesteld uit 20 leds, is 46 lumen, of 35 lumen per watt. Dat maakt hem bijna even efficiënt als de halogeenlamp. LED-producenten hebben echter nog wat in te halen. De levensduur van een LED-lamp is 50.000 uur, acht keer hoger dan halogeen. Terwijl ik dit schrijf, zie ik op www.cree.com leds te koop voor 100 lumen per watt. Toekomstige leds zullen volgens plan meer dan 150 lumen per watt leveren [ynjzej]. Ik verwacht dat LED's binnen enkele jaren de eerste keuze zullen zijn, zowel voor een betere energie-efficiëntie als voor het vermijden van kwikverontreiniging.

Tabel.9.5: *Lichtefficiëntie van in de handel verkrijgbare lichtbronnen. Verwacht wordt dat leds in de toekomst een efficiëntie van 150 lumen/W zullen hebben.*

Type lamp	Rendement (Lumen/W)
Gloeidraad	10
Halogeen	16-24
Witte LED	35
Compacte spaarlamp	55
Grote energiebesparende lamp	94
Natriumstraatlantaarn	150

Mythen en legenden

Ik zie geen reden om over te schakelen op spaarlampen. De "verspilde" energie verwarmt mijn huis, dus is het geen verspilde energie.

Deze mythe wordt behandeld in [hoofdstuk 11](#) op bladzijde [080].

[067] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[064]	Straatverlichting verbruikt 0,1 kWh/d/p: Er is ruwweg één natriumstraatlantaarn per 10 bewoners; elke lantaarn is 100 W, en brandt 10 uur per dag. Dat is 0,1 kWh/d/p.
[064]	en verkeerslichten slechts 0,005 kWh/d/p: Engeland telt 420.000 verkeers- en voetgangerslichten die jaarlijks 100 miljoen kWh elektriciteit verbruiken. Verdeeld over 60 miljoen mensen is 100 miljoen kWh per jaar het equivalent van 0,005 kWh/d per persoon.
[065]	Hoe zit het met andere openbare verlichting zoals verkeers- en informatieborden: [www-highwayelectrical.org.uk]. Er zijn in totaal 7,7 miljoen verlichtingsinstallaties (straatverlichting, verlichte verkeersborden en meerpalen) in Engeland. Daarvan zijn er ongeveer 7 miljoen straatlantaarns en 1 miljoen verkeersborden. Er zijn 210.000 verkeersborden. Volgens DUKES 2005 bedraagt de totale output voor openbare verlichting 2.095 GWh/j, wat neerkomt op 0,1 kWh/d/p,
[065]	een 55% efficiënte alternator: Bron: en.wikipedia.org/wiki/Alternator. Generatoren in elektriciteitscentrales zijn veel efficiënter in het omzetten van mechanische energie in elektrische energie.

10 offshore wind

Offshore windenergie

Het offshore-windmolenpark London Array zal een cruciale bijdrage leveren tot de verwezenlijking van de doelstellingen van het Verenigd Koninkrijk inzake hernieuwbare energie.

James Smith, voorzitter van Shell UK

Elektriciteit is een te vitaal goed om te worden gebruikt als programma voor het scheppen van werkgelegenheid in de windturbine-industrie.

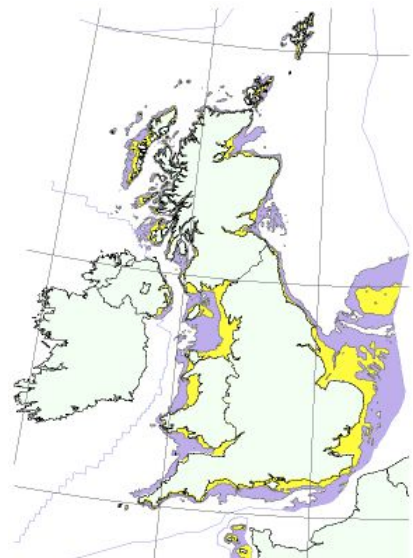
David J. White



De wind op zee is sterker en gelijkmatiger dan aan land, zodat windparken op zee meer stroom per oppervlakte-eenheid leveren dan windparken op het vasteland. Het windmolenpark van Kentish Flats in de monding van de Theems, ongeveer 8,5 km uit de kust van Whitstable en Herne Bay, werd in 2005 in gebruik genomen. In de planning was uitgegaan van een gemiddeld vermogen van $3,2 \text{ W/m}^2$, maar het werkelijke vermogen in 2006 bedroeg $2,6 \text{ W/m}^2$.

Fig.10.1: (links) Kentish Flats - een off-shore windmolenpark in ondiep water. Elke rotor heeft een diameter van 90 m, de ashoogte is 70 m. Elke "3 MW"-turbine weegt 500 ton, waarvan de helft de fundering is. Foto met dank aan © Elsam (elsam.com.)

Fig.10.2: (rechts) Britse wateren met waterdiepten onder 25 m (geel) en diepten tussen 25 en 50 meter (paars). Gegevens uit de DTI Atlas van hernieuwbare mariene bronnen © Crown copyright.



[069] Ik ga ervan uit dat een vermogen per oppervlakte-eenheid van 3 W/m^2 (50% meer dan onze raming voor aan land) haalbaar is in windmolenparken voor de kust rond geheel Engeland. Nu moeten we nog een schatting maken van het gebied buiten de kust dat realistisch gezien door windturbines kan worden bestreken. Gewoonlijk wordt een onderscheid gemaakt tussen turbines in ondiep water en op volle zee (zie **Fig.10.2**). De algemene teneur lijkt te zijn dat windmolenparken in ondiep water (diepte minder dan 25-30 m), die ongeveer tweemaal zoveel kosten als windmolenparken aan land, economisch haalbaar zijn met matige subsidies, maar windmolenparken op volle zee zijn dat niet. Momenteel (2008) is er slechts één offshore-windmolenpark in Britse wateren, een experimenteel prototype dat al zijn energie naar een nabijgelegen olieplatform, Beatrice genaamd, stuurt.

Off-shore in ondiep

Er is ongeveer 40.000 km² ondiep water in de wateren van het VK, vooral voor de kust van Engeland en Wales.

Het gebied komt overeen met tweemaal de oppervlakte van Wales. De gemiddelde beschikbare output van windmolenparken die het hele gebied beslaan, zou 120 GW of 48 kWh/d per persoon zijn. Maar er wordt niet verwacht dat een dergelijke regeling aanvaardbaar zou zijn voor de scheepvaart. Grote delen van het gebied zouden zeker niet in aanmerking komen omdat rekening moet worden gehouden met de eisen van de scheepvaart en de visserij. Ik stel voor de werkelijk beschikbare oppervlakte op een derde te schatten (zie de aantekeningen bij dit hoofdstuk voor een nog pessimistischer benadering). Dit geeft ons 16 kWh/d per persoon voor de maximaal mogelijke opbrengst van offshore windparken (in ondiep water).

Alvorens verder te gaan, wil ik nogmaals wijzen op de immense oppervlakte - tweederde van Wales - die nodig is om deze 16 kWh/d/p op te wekken. Als we de hele kustlijn van het VK nemen (lengte 3.000 km) en een gordel van 4 km breed vullen met turbines, zou die gordel een oppervlakte hebben van 13.000 km². Dat is genoeg om de 16 kWh/d per persoon op te wekken. Of andersom, laten we eens kijken naar het aantal benodigde turbines: 16 kWh/d per persoon wordt opgewekt door 44.000 "3MW" turbines, dat zijn er 15 per kilometer kustlijn.

Off-shore windenergie is moeilijk te realiseren vanwege de corrosieve werking van zeewater. In het grote Deense windmolenpark Horns Reef moesten alle 80 turbines hierdoor al na 18 maanden worden verwijderd en gerepareerd. De turbines in Kentish Flats schijnen



soortgelijke problemen te hebben met hun tandwielkasten, een derde was defect binnen de eerste 18 maanden.

Kust op volle zee

Het gebied met waterdieptes tussen 25 m en 50 m is ongeveer 80.000 km² - de grootte van Schotland. Uitgaande van opnieuw 3W/m², zouden windmolenparken daar nog eens 240 GW of 96 kWh/d per persoon kunnen leveren als het hele gebied zou worden gebruikt. Ook hier maken we corridors voor schepen en beperken we ons tot een derde van het gebied, wat ongeveer 30% meer is dan Wales, en een groot deel daarvan ligt verder dan 50 km van land. [070] Resultaat: als het gebied van een 9 km brede strook rond de kustlijn wordt gevuld met windturbines, zou dat 32 kWh/d per persoon kunnen opleveren. Veel kracht, toegegeven, maar nog steeds geen partij voor ons enorme verbruik. En we hebben het probleem van de intermitterendheid van wind nog niet aangepakt. Daar komen we in hoofdstuk 26 op terug.

Ik wil dit potentieel opnemen als een bijdrage van offshore-windenergie in onze stapel, met het voorbehoud dat winddeskundigen deze bijdrage om kostentechnische redenen als gedoemd zien te mislukken.

Enkele vergelijkingen en kosten

Dus wat zijn de kosten versus de opbrengst in onze race? Als we offshore windenergie in ondiep water en offshore aan onze productiestapel toevoegen, neemt deze de koppositie in. Wat ik nog meer wilde zeggen over deze race: Hoe gemakkelijk is het om een groter blok op het vuur van de consumptie te gooien, en hoe moeilijk is het om de productiestapel te doen groeien. Terwijl ik dit schrijf, heb ik het een beetje koud en loop ik naar de thermostaat om hem wat hoger te zetten. Zo makkelijk is het om 30 kWh per dag extra te verbruiken.

Afb.10.4: Het Magnus-platform in de Noord-Engelse sector van de Noordzee bevat 71.000 ton staal. In 2000 leverde dit platform 3,8 miljoen ton olie en gas - een capaciteit van 5 GW. Kosten van het platform: 1,1 miljard euro. Foto door Terry Caver.

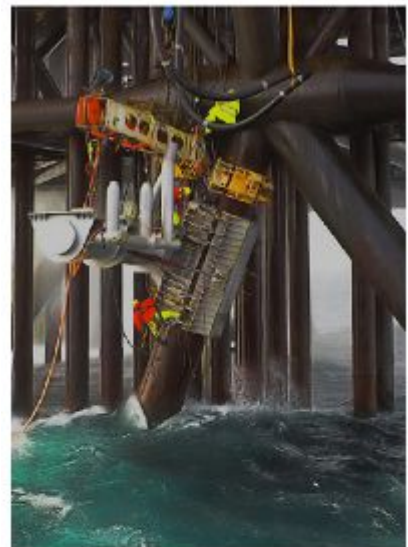


Fig.10.5: Pijpleidingbuizen voor Langeled. Van Bredero-Shaw [brederoshaw.com].



Maar om 30 kWh per dag per persoon uit hernieuwbare hulpbronnen te persen is een industrialisatie van het milieu nodig waarvan de reikwijdte bijna onvoorstelbaar is. Om de bovengenoemde 48 kWh/d/p off-shore windcapaciteit rond Engeland te bouwen is **60 miljoen ton beton en staal nodig** - één ton per persoon. De wereldproductie van staal bedraagt 1200 miljoen ton per jaar, of 0,2 ton per persoon wereldwijd. Tijdens WO II bouwden de Amerikanen 2751 Liberty vrachtschepen met elk 7000 ton staal, dat was 0,2 ton per Amerikaan. Dus 60 miljoen ton windturbines is technisch gezien niet onhaalbaar; maar maak jezelf niet wijs dat het gemakkelijk zou zijn. Zoveel windmolens bouwen is net zo'n grote onderneming als de Liberty vrachtschepen.

Ter vergelijking: om de 48 kWh/d per persoon van kerncentrales te installeren, zou Engeland slechts **8 miljoen ton staal en 0,14 miljoen ton** Q13¹³ beton nodig hebben. We kunnen de 60 miljoen ton aan off-shore-windapparatuur ook vergelijken met de bestaande platforms en installaties in de fossiele-brandstofsector in en rond de Noordzee (fig.10.4): rond 1997 bevatten de 200 installaties en 7000 km pijpleiding in de Engelse wateren **8 miljoen ton staal en beton**. Voor de nieuwe Langeled-gaspijpleiding van Noorwegen naar Engeland, die gas vervoert voor een capaciteit van 25 GW (10 kWh/d/p), waren nog eens **1 miljoen ton staal en 1 miljoen ton beton** nodig (fig.10.5).

Fig.10.8: *Bouw van het Beatrice Demonstratie Offshore Windmolenpark in diep water. Foto met dank aan Talisman Energy (UK) Limited.*



Op 10 december 2007 kondigde de Engelse regering aan dat zij haar goedkeuring had gehecht aan de bouw van een off-shore windmolenpark van 33 GW (dat gemiddeld 10 GW of 4,4 kWh/d/p aan Engeland zou leveren), een plan dat door sommigen in de windindustrie een "utopie" werd genoemd. Laten we 4 kWh/d/p berekenen, wat een kwart is van mijn benadering van 16 kWh/d/p voor ondiepe wateren. Om dit gemiddelde vermogen te realiseren zijn ongeveer 10.000 "3MW" turbines nodig zoals die in fig.10.1. (Ze hebben een vermogen van "3MW" piek, maar leveren gemiddeld 1 MW, voor identificatiedoeleinden zet ik de piekvermogens hier en in het volgende tussen aanhalingstekens).

13) Q13 Dit cijfer is volgens de auteur onjuist, in zijn errata geeft hij 140 miljoen ton als de juiste waarde, maar ook dit is naar mijn mening niet aannemelijk.

[071] Wat zou de productie van deze "33GW" kosten? De "90MW" Kentish Flat Farm kostte 105 miljoen euro ^{Q1414}, dus "33GW" kostte ongeveer 33 miljard euro. Om een beter idee te krijgen van deze 33 miljard kosten van de 4 kWh/d/p, kunt u ze spreiden over de bevolking: 550 euro per persoon. Dat is overigens een aanzienlijk betere deal dan kleine windturbines. Dergelijke kleine op het dak gemonteerde turbines kosten momenteel ongeveer 1 500 euro en leveren slechts 1,6 kWh/d, zelfs bij een optimistisch veronderstelde windsnelheid van 6 m/s. In werkelijkheid leveren bestaande kleine windturbines op typische Engelse stadslocaties 0,2 kWh per dag.

Een ander knelpunt bij de bouw van deze off-shore windturbines is de behoefte aan speciale schepen. Om binnen 10 jaar 10.000 turbines ("33GW") te bouwen, zijn ongeveer 50 grote hefeilanden (hydraulische pontons) nodig. [072] Deze kosten 60 miljoen euro per stuk, wat een extra investering van 3 miljard euro vergt. Dit is zeker geen knock-out-criterium in vergelijking met de totale kosten van 33 miljard euro, maar het is wel al een detail dat een speciale planning vereist.

Verlies van vogels

Doden windturbines "grote aantallen" vogels? Windmolenparken haalden onlangs de Noorse krantenkoppen omdat turbines op Smola, een eilandengroep voor de noordwestkust, in tien maanden tijd negen zeearenden doodden. Ik deel de bezorgdheid van BirdLife International over het welzijn van zeldzame vogels. Maar ik denk, zoals altijd, dat we naar de cijfers moeten kijken. Naar schatting sterven jaarlijks bijna 30.000 vogels door windturbines in Denemarken, waar windmolens in 9% van de elektriciteitsbehoefte van het land voorzien. Horror! Verbied de windmolens! We leren ook dat het wegverkeer in Denemarken jaarlijks een miljoen vogels doodt. Dertig keer de verschrikking! Dertig keer meer reden om auto's te verbieden! En in Engeland worden jaarlijks 55 miljoen vogels gedood door katten (**fig.10.6**) ^{Q1515}.

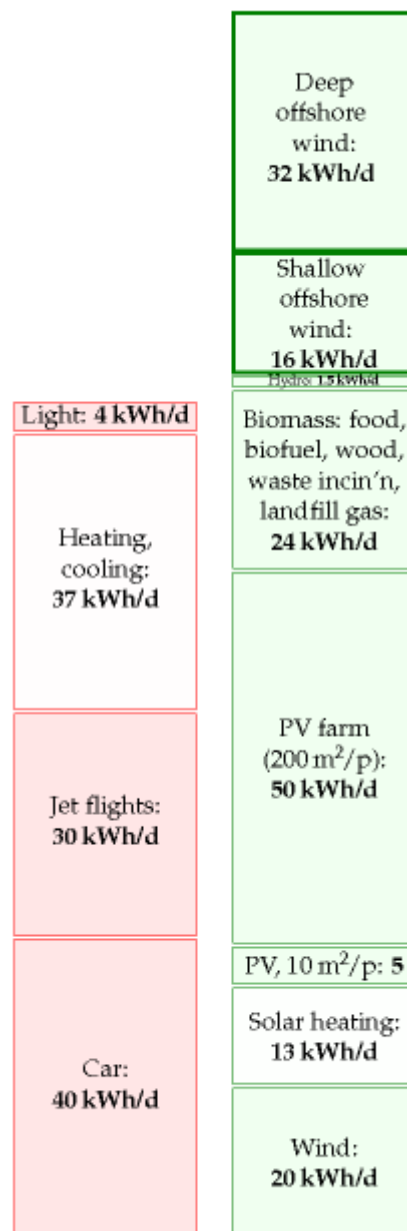


Fig.10.3: Off-shore wind

14) **Q14** De oorspronkelijke cijfers zijn in Engelse ponden, die ik heb omgerekend tegen 1:1 (niet veel verlies van nauwkeurigheid bij de huidige wisselkoers van 1:1,098).

15) **Q15** Deze vergelijking moet niet al te serieus worden genomen, vooral omdat de gegevensbasis (Denemarken aan de ene kant en Engeland aan de andere kant) niet dezelfde is.

Op een zuiver emotioneel niveau zou ik liever leven in een land waar vrijwel geen auto's en geen windmolens zijn, en met heel veel katten en vogels (waar de katten op de vogels jagen, en misschien worden opgejaagd door zeearenden om het natuurlijk evenwicht te bewaren). Maar wat ik echt hoop is dat beslissingen over auto's en windmolens worden genomen na zorgvuldige rationele overwegingen, en niet puur emotioneel. Het kan zijn dat we de windmolens nodig hebben!

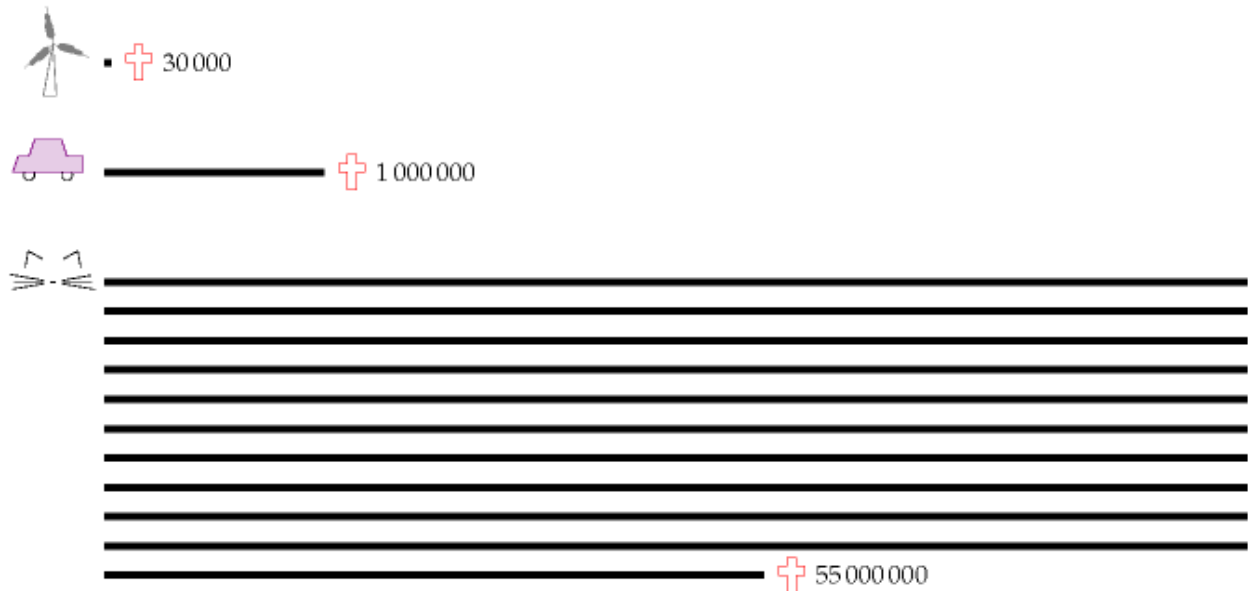


Fig.10.6: *Gevallen vogels. Jaarlijkse vogelsterfte in Denemarken door windturbines en voertuigen, jaarlijkse vogelsterfte in Engeland door katten volgens Lomborg (2001). Botsingen met ruiten eisen een vergelijkbaar aantal slachtoffers.*

[073] Opmerkingen en referenties

Pagina																																				
[068]	Windmolenpark Kentish Flats: zie www-kentishflats.co.uk. De 30 Vestas V90-windturbines hebben een totaal piekvermogen van 90 MW, het voorspelde gemiddelde vermogen is 32 MW (bij een belastingsfactor van 36%). De gemiddelde windsnelheid op ashoogte is 8,7 m/s. De turbines bevinden zich in 5 m diep water, 700 m uit elkaar, verspreid over een gebied van 10 km². De vermogensdichtheid werd geraamd op 3,2 W/m². In feite bedroeg het vermogen 26 MW, zodat de belastingsfactor in 2006 29% bedroeg [wbd80]. Dit resulteert in een vermogensdichtheid van 2,6 W/m². Het North Hoyle Windfarm bij Prestatyn, Noord-Wales, had een hogere belastingsfactor van 36% in 2006. Hun dertig 2MW turbines beslaan 8,2 km². Ze hadden dus een vermogensdichtheid van 2,6 W/m².																																			
[068]	dat windmolenparken in ondiep water (diepte minder dan 25-30 m), die ongeveer tweemaal zoveel kosten als windmolenparken aan land, economisch haalbaar zijn met matige subsidies: Bron: Deense windvereniging windpower.org. "Offshore windmolenparken zijn dat echter niet" Bron: British Wind Energy Association briefing document, september 2005, www-bwea.com. Voor een demonstratieproject in diep water in 2007 werden niettemin twee turbines geplaatst bij het olieveld Beatrice, 22 km uit de kust van Schotland (fig.10.8). Elke turbine heeft een "vermogen" van 5MW en bevindt zich in 45 meter diep water. Schachthoogte: 107m; diameter 126m. Alle opgewekte elektriciteit wordt gebruikt op de olieplatforms. Is dat niet grappig? Het project van 10 MW kost 30 miljoen, deze prijsklasse van 3€ per Watt(piek) kan worden vergeleken met Kentish Flats, daar is het 1,2 € per Watt (105 miljoen voor 90 MW). www-beatricewind.co.uk Het is mogelijk dat drijvende turbines de economische aspecten van windenergie in diepe wateren zullen veranderen. [074] <table><tr><th>Regio</th><th colspan="2">Diepte 5-30 m</th><th colspan="2">Diepte 30-50 m</th></tr><tr><th></th><th>Potentieel (km²)</th><th>gebied (kWh/d/p)</th><th>Potentieel (km²)</th><th>gebied (kWh/d/p)</th></tr><tr><td>Noordwest</td><td>3.300</td><td>6</td><td>2.000</td><td>4</td></tr><tr><td>Groter Wash</td><td>7.400</td><td>14</td><td>950</td><td>2</td></tr><tr><td>Theemsmonding</td><td>2.100</td><td>4.</td><td>850</td><td>2</td></tr><tr><td>Overige</td><td>14.000</td><td>28</td><td>45.000</td><td>87</td></tr><tr><td>Totaal</td><td>27.000</td><td>52</td><td>49.000</td><td>94</td></tr></table> <i>Tabel 10.7: Potentiële offshore windbronnen in de getoonde strategische regio's regio's, als deze regio's volledig gevuld zouden zijn met turbines. gevuld met turbines. Dept. van Handel en Industrie (2002b)</i>	Regio	Diepte 5-30 m		Diepte 30-50 m			Potentieel (km²)	gebied (kWh/d/p)	Potentieel (km²)	gebied (kWh/d/p)	Noordwest	3.300	6	2.000	4	Groter Wash	7.400	14	950	2	Theemsmonding	2.100	4.	850	2	Overige	14.000	28	45.000	87	Totaal	27.000	52	49.000	94
Regio	Diepte 5-30 m		Diepte 30-50 m																																	
	Potentieel (km²)	gebied (kWh/d/p)	Potentieel (km²)	gebied (kWh/d/p)																																
Noordwest	3.300	6	2.000	4																																
Groter Wash	7.400	14	950	2																																
Theemsmonding	2.100	4.	850	2																																
Overige	14.000	28	45.000	87																																
Totaal	27.000	52	49.000	94																																
[069]	Het voor offshore-windenergie beschikbare gebied: Het DTI's Future Offshore document (2002) geeft een gedetailleerd overzicht van gebieden die kunnen worden gebruikt voor offshore-windenergie. Tabel.10.7. geeft de geschatte voorraden in 76.000 km² ondiep water. De door DTI geraamde output indien het gehele gebied met windmolens gevuld zou zijn, bedraagt 146 kWh/d per persoon (waarvan 52 kWh/d/p opgewekt in ondiep water, 94 kWh/d/p opgewekt in diep water). Maar de realistische ra-																																			

	ming van het DTI van de potentiële off-shore windenergie noemt slechts 4,6 kWh/d/p. De manier waarop de DTI terugwerkt van 146 kWh naar 4,6 kWh per dag per persoon is interessant. Waarom liggen de definitieve DTI-ramingen zo ver onder die van ons? Ten eerste beperkten zij: een afstand tot 30 km uit de kust, waterdiepte niet meer dan 40 m, helling van de zeebodem niet steiler dan 5°. Militaire verboden zones, pijpleidingen, visgronden en natuurreservaten werden uitgesloten. Ten tweede gingen zij ervan uit dat slechts 5% van de potentiële locaties zou worden ontwikkeld (ten gevolge van de toestand van de zeebodem of planningsbeperkingen) en verminderden zij de capaciteit in het kustgebied tot 10 mijl met 50% om redenen van aanvaardbaarheid voor het publiek. Zij hebben de capaciteit verder verminderd met 95% voor gebieden met windsnelheden van meer dan 9 m/s, en met 5% voor gebieden met windsnelheden van 8-9 m/s, wegens "belemmeringen voor de ontwikkeling door een vijandige omgeving".
[069]	Als we de hele kustlijn van het VK nemen (lengte 3.000 km) en een gordel van 4 km breed: pedanten kunnen zeggen dat de kustlijn geen welbepaalde lengte heeft omdat hij fractaal is. Ja, het is fractaal, maar, beste pedant, neem een kaart en een strook turbines van 4 km breed rond het belangrijkste Britse eiland, en kijk of dat niet toch 3.000 km lang is. [075]
[069]	Horns Reef (Horns Rev). De problemen van dit Deense "160MW" windmolenpark voor de kust van Jutland [www-hornsrev.dk] zijn beschreven door Halkema (2006).
[070]	Liberty schepen -www-liberty-ship.com/html/yards/introduction.html
[070]	200 turbines en 7000 km pijpleiding in Engelse wateren 8 miljoen ton staal en beton - Rice en Owen (1999).
[070]	kondigde de Engelse regering aan dat zij haar goedkeuring had gehecht aan de bouw van een off-shore windmolenpark van 33 GW [25e59w].
[070]	"Kasteel in de lucht" Bron: Guardian [2t2vjq].
[071]	Wat zou de productie van deze "33GW" kosten? Volgens publicaties van het DTI in november 2002 kost elektriciteit uit off-shore windmolenparken ongeveer 50 euro per MWh (5 ct/kWh) (Dept. of Trade and Industry, 2002b, p21). De economische feiten veranderen echter en in april 2007 bedroegen de geraamde kosten maar liefst 92 euro per MWh (Dept. of Trade and Industry, 2007, p7). In april 2008 steeg de prijs van off-shore-windenergie nog verder, toen Shell zijn verbintenis om de London Array te bouwen, introk. Omdat offshore-windenergie zo duur is, moest de regering het aantal ROC's (hernieuwbare-verplichtingcertificaten) per eenheid off-shore-windenergie verhogen. Het ROC is de steunverlenende eenheid voor bepaalde vormen van duurzame energieproductie. De gebruikelijke waarde van een ROC is £45, met 1 ROC per MWh; met een kleinhandelsprijs van ongeveer £40/MWh krijgen hernieuwbare energieproducenten dus £85 per MWh betaald. 1 ROC per MWh is dus niet genoeg subsidie om de kosten van 92 pond per MWh te dekken. Hetzelfde document geeft de volgende kosten voor andere hernieuwbare energiebronnen (mediane kosten voor 2010). Windenergie aan land: 65-89 £/MWh; warmtekrachtkoppeling op basis van biomassa: 53 £/MWh; grote waterkrachtcentrales: 63 £/MWh; stortgas: 38 £/MWh; zon-PV: 571 £/MWh; golfenergie: 196 £/MWh; getijdenenergie: 177 £/MWh. "Dale Vince, chieft executive van de leverancier van groene energie Ecotricity, die betrokken is bij de bouw van windmolenparken, zei dat hij de off-shore windplannen van de regering steunde, maar alleen als ze niet ten koste zouden gaan van windenergie aan land. Het is gevaarlijk om de fantastische hulpbronnen die we in dit land hebben, over het hoofd te zien ... Onze

	schatting is dat het zo'n 40 miljard euro zal kosten om de 33 GW te bouwen die Hutton aanprijst, off-shore. We zouden hetzelfde on-shore kunnen doen voor 20 miljard euro. "[57984r]  Fig.10.9: <i>Kentish Flats, foto's met dank aan © Elsam (elsam.com)</i>
[071]	[076] kleine windturbines op typische Engelse stedelijke locaties 0,2 kWh per dag: bron: Derde tussentijdse rapportage, www-warwickwindtrials.org.uk/2.html. Een van de best presterende machines in het Warwick Wind Trials-onderzoek is de Windsave WS1000 (een machine van 1 kW) in Daventry. Geplaatst op een hoogte van 15 m boven de grond produceert hij gemiddeld 0,6 kWh/d. Maar sommige microturbines leveren slechts 0,05 kWh per dag - bron: Donnachadh McCarthy: "My carbonfree year," The Independent, december 2007 [60c3ja]. De Windsave WS1000 windturbine, verkocht in B&Q winkels in het Verenigd Koninkrijk, won de Eco-Bollocks award van Housebuilder's Bible auteur Mark Brinkley: "Kom op, het is tijd om toe te geven dat de op het dak gemonteerde windturbine-industrie een compleet fiasco is. Er wordt veel geld gestoken in een uitvinding die niet werkt. Dit is de Sinclair C5 van de Noughties." [5soql2]. Het Met Office en Carbon Trust hebben in juli 2008 een rapport gepubliceerd [6g2jm5] waarin wordt geschat dat kleine turbines, wanneer ze in het VK op daken van woningen worden geïnstalleerd waar dat economisch verantwoord is, in totaal ongeveer 0,7 kWh/d/p leveren. Zij waarschuwen dat turbines op daken in steden meestal erger dan nutteloos zijn: "op veel stedelijke locaties kunnen op daken gemonteerde turbines niet evenveel CO₂ besparen als hun fabricageproces verbruikt".
[071]	hefeilanden (hydraulische pontons) kosten 60 miljoen euro per stuk: Bron: news-bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm. Ik schatte dat we er ongeveer 50 nodig zouden hebben, ervan uitgaande dat elk jaar 60 niet-werkdagen heeft en het 3 dagen duurt om een turbine op te richten.
	Verder lezen: UK wind energy database [www-bwea.com/ukwed/] (404)

11 elektronica

Kleine elektronica – Gadgets

Een van de grootste gevaren voor de samenleving is de oplader van mobiele telefoons. BBC nieuws waarschuwt hier al voor sinds 2005:

"Kerncentrales zullen over een paar jaar worden gesloten. Wat moet ik doen om ervoor te zorgen dat het licht niet uitgaat in Engeland? ... Haal de oplader van je gsm uit het stopcontact als je hem niet nodig hebt."

Helaas, jaren later, heeft Engeland die boodschap nog steeds niet begrepen, en de BBC moest verslag uitbrengen

"Engeland staat bovenaan lijst van energie verspillers".

Dus hoe is dit gebeurd? De BBC brengt de boodschap naar ons toe:

"65% van de Engelse consumenten laten hun opladers aanstaan".

Met berichten als deze over deze planeetvernietigende objecten, beseffen we dat ze ongeveer net zo gevaarlijk moeten zijn als..... Maar hoe slecht zijn ze eigenlijk?

In dit hoofdstuk, vinden we de waarheid over de laders. We kijken ook naar hun neven in de consumentenelektronica: Computers, telefoons en TV's, digitale ontvangers, kabelmodems. Hier maken we een schatting van de stroom die we gebruiken wanneer we ze bedienen en opladen, maar niet van de stroom die wordt gebruikt om ze te fabriceren - dat gebeurt verderop in [hoofdstuk 15](#).

De waarheid over opladers

Moderne opladers voor mobiele telefoons gebruiken, wanneer ze in het stopcontact zitten terwijl de telefoon niet is aangesloten, ongeveer een halve watt. In onze voorkeurseenheden komt dat neer op een energieverbruik van 0,01 kWh/d. Iedereen met een energieverbruik van ongeveer 100 kWh/d zou het advies van de BBC kunnen opvolgen om "altijd de stekker uit het stopcontact te halen voor het opladen van mobiele telefoons" en zijn verbruik met een honderdste van een procent te verminderen (als ze het uiteindelijk maar zouden doen).



Vader



Charger

Fig.11.1: *Planeetvernietigers, nauwelijks verschil.*

Fig.11.2: *Deze vijf opladers - drie voor mobiele telefoons, één voor een handheld PC, één voor een laptop - gaven minder dan één watt aan op mijn meter.*



Elke kleine stap telt!

Dat is niet hoe ik denk. Obsessief de stekker uit het stopcontact halen is net zoiets als het water uit de Titanic scheppen met een theekopje. Trek de stekker eruit, maar besef alsjeblieft wat een klein gebaar het is. Laat ik het zo zeggen:

Alle energie die je op een dag kunt besparen door opladers los te koppelen, wordt in een seconde rijden weer tenietgedaan.

De energie die over een heel jaar wordt bespaard door opladers los te koppelen, komt overeen met de energie van één warm bad.

Toegegeven, sommige oude laders gebruiken meer dan een halve watt - als hij warm aanvoelt, gebruikt hij waarschijnlijk een watt of zelfs drie (**Fig.11.3**). Een lader die 3 watt verbruikt, verbruikt 0,07 kWh per dag. Ik denk dat het een goed idee is om hem uit te zetten, dat scheelt je ongeveer 3€ per jaar. Maar lieg niet tegen uzelf en denk niet dat u uw steentje al hebt bijgedragen, 3 W is slechts een fractie van het totale verbruik.

Fig.11.3: *Deze verkwistende draadloze telefoon en zijn lader gebruiken 3 W als ze aangesloten blijven. Dat is 0,07 kWh/d. Bij een elektriciteitsprijs van 10 cent per kWh kost die 3W druppel €3 per jaar.*



Oké, genoeg over de Titanic redden met het theekopje. Laten we eens kijken waar elektrische energie werkelijk wordt verbruikt.

Gadgets die echt stroom verbruiken

Tabel.11.4 toont het stroomverbruik, in watt, van de meest gebruikte apparaten in huis. De eerste kolom bevat het vermogen wanneer het gadget in gebruik is - zoals een stereo-installatie die speelt. De tweede kolom geeft het verbruik aan wanneer het toestel niets doet. Ik was nogal geschokt toen ik ontdekte dat een laserprinter 17 W verbruikt in de standby-stand, evenveel als een gemiddelde diepvriezer. De derde kolom geeft het verbruik van het toestel weer wanneer het expliciet in slaap- of stand-by is gezet. De vierde geeft het verbruik aan wanneer het toestel uitgeschakeld is, maar de stekker in het stopcontact blijft. Alle cijfers zijn in watt - om om te rekenen naar onze standaardeenheden, moet u bedenken dat 40 W ongeveer overeenkomt met 1 kWh/d. Een leuk geheugensteuntje is trouwens dat één watt ongeveer één euro per jaar kost (uitgaande van elektriciteitskosten van 10 cent per kWh).

De grootste stroomvreters zijn de computer, het beeldscherm en de TV; zij verbruiken enkele honderden watts als zij aan staan. Entertainment systemen zoals stereo's of DVD-spelers zwemmen in het kielzog van de computer, bij 10W of zo. Een DVD-speler kan te koop zijn voor 20 pond, maar als u hem de hele tijd aan laat staan, kost hij u nog eens 10 pond per jaar. [079] Sommige stereo's en randapparatuur voor computers hebben zelfs in uitgeschakelde toestand een paar watt nodig, vanwege hun stroomvoorziening. Als u zeker wilt zijn dat een apparaat echt uit is, moet u de stekker uit het stopcontact halen.

Het verborgen verbruik van het informatietijdperk
Volgens Jonathan Koomwey (2007) vergen de computers in de datacentra van de VS en de daarvoor benodigde airconditioning in totaal 0,4 kWh per dag per persoon, iets meer dan 1% van het verbruik van het land. Hij keek naar het verbruik in 2005, dat waarschijnlijk het dubbele zal zijn van dat in 2000, aangezien het aantal servers in die periode is gestegen van 5,6 miljoen tot 10 miljoen.

Fig bij Tabel.11.4: *Stroomverbruik van verschillende kleine apparaten, in watt. (40 W is 1 kWh/d.)*



Tabel.11.4: Stroomverbruik van verschillende kleine apparaten in watt. (40 W is 1 kWh/d.)

Apparaat	Stroomverbruik (W)			
	Aan actief	Aan inactief	Stand-by	Uit
Computer en randapparatuur:				
PC	80	55		2
CRT-monitor	110		3	0
LCD-monitor	34		2	1
Projector	150	5		
Laserprinter	500	17		
Wlan- of kabelmodem	9			
Laptop	16	9		0.5
Draagbare CD-speler	2			
Radio-alarmklok	1.1	1		
Radio-alarmklok	1.9	1.4		
Digitale radio	9.1		3	
Radio-cassetterecorder	3	1.2		1, 2
Stereo-installatie	6			6
Stereo-installatie II	13			0
Home cinema-geluid	7	7	4	
DVD-speler	7 6			
DVD-speler II	12	10	5	
TV-toestel	100		10	
Videorecorder	13		1	
Digitale TV-topbox	6		5	
Klok op microgolfoven	2			
Xbox	160		2,4	
Sony Playstation3	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
Antwoordapparaat		2		
Antwoordapparaat II		3		
Draadloze telefoon		1,7		
Lader mobiele telefoon	5	0,5		
Stofzuiger	1600			

Andere kleine apparaten

Een stofzuiger die een paar uur per week wordt gebruikt, komt overeen met ongeveer **0,2 kWh/d**. Het gras maaien kost ongeveer **0,6 kWh**. Zo kunnen we nog wel even doorgaan, maar ik vermoed dat computers en consumentenelektronica de gro-

te slokken zijn in de energiebalans van de meeste mensen.

De conclusie van het hoofdstuk: het hangt er sterk van af hoeveel apparaten iemand gebruikt, maar een gezonde hoeveelheid elektronica voor thuis en op het werk kan bij regelmatig gebruik gemakkelijk oplopen tot **5 kWh/d**.

[080]

Mythen en legenden

Er is geen reden om lichten, tv's of opladers uit te zetten in de winter. De "verspilde" energie is mijn huis aan het verwarmen, dus is het geen verspilde energie.

Deze mythe is waar voor een paar mensen, maar alleen in de winter, maar onjuist voor de meesten.

Als uw huis elektrisch wordt verwarmd, met gewone accumulatiekachels of ventilatiekachels, dan, ja, dan is het praktisch net als verwarmen via afvalwarmte van elektrische apparaten. Maar in deze situatie moet u dringend het verwarmingssysteem van uw huis vervangen. Elektriciteit is energie met een hoge waarde en warmte is energie met een lage waarde. Het is zonde om elektriciteit om te zetten in warmte. Meer bepaald is het een verspilling om slechts één eenheid warmte-energie te maken uit één eenheid elektrische energie. Verwarmingstoestellen, luchtwarmtepompen of grondwaterwarmtepompen genoemd, doen dit veel beter en leveren 3 tot 4 eenheden warmte-energie voor één eenheid gebruikte elektrische energie. Ze werken als een omgekeerde koelkast, waarbij warmte uit de omgeving in uw huis wordt gepompt (zie [hoofdstuk 21](#)).

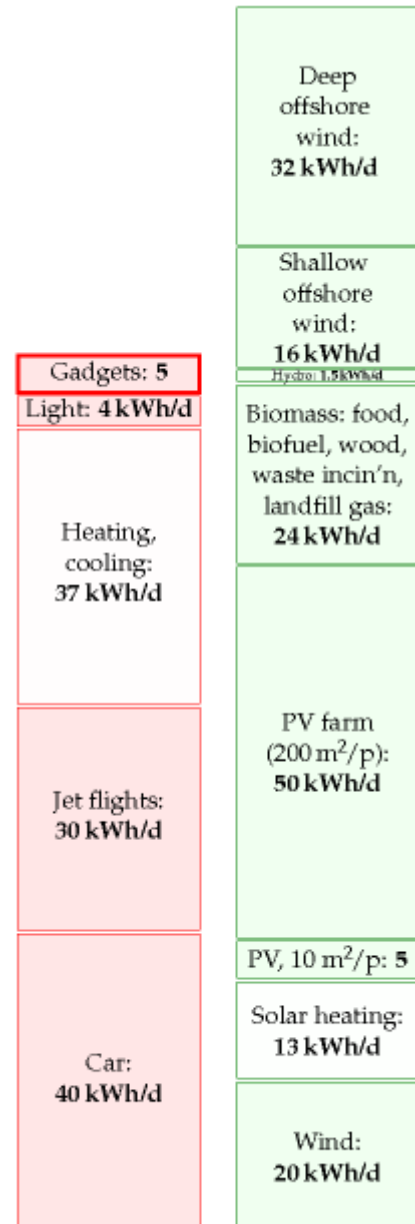
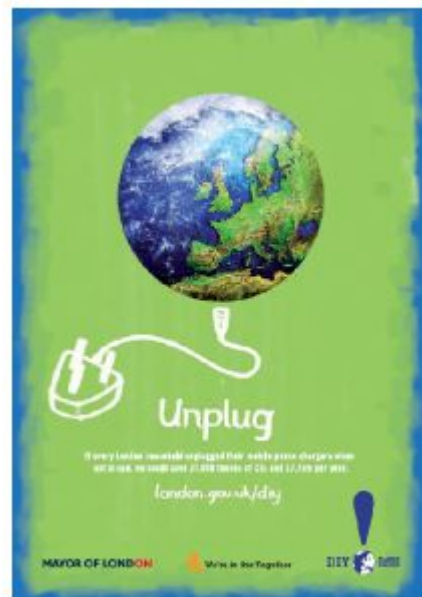


Fig.11.5: Informatiesystemen en andere apparatuur

Voor de rest van ons, wier huizen worden verwarmd met fossiele brandstoffen of biobrandstoffen, is het een goed idee om elektrische apparaten te vermijden als warmtebron - althans zolang in onze elektriciteitsbehoeften wordt voorzien met fossiele brandstoffen. Dan is het beter om thuis fossiele brandstoffen te verbranden. Het punt is: wanneer je elektriciteit uit met fossiele brandstoffen gestookte centrales haalt, gaat de helft van de brandstofenergie helaas door de koeltoren. Van de elektriciteit die u op die manier verkrijgt, gaat nog eens ongeveer 8% verloren aan het elektriciteitsnet. Als u de brandstof thuis verbrandt, wordt veel meer energie rechtstreeks gebruikt om uw warme lucht te verwarmen.

Afb.11.6: Reclame voor de campagne "Doe-het-zelf planeet reparaties". De tekst betekent: "Ontkoppelen. Als elk huishouden in Londen zijn ongebruikte opladers uit het stopcontact zou halen, zouden we 31.000 ton CO₂ en 7,75 miljoen £ per jaar kunnen besparen" london.gov.uk/diy/



[081] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[077]	BBC news waarschuwt hier al voor sinds 2005: het BBC-artikel uit 2005 luidde: "De kerncentrales zullen over een paar jaar allemaal worden gesloten. Hoe kan Engeland zijn lichten aanhouden? Hier zijn drie manieren waarop u energie kunt besparen: Zet hun videorecorders uit wanneer ze niet worden gebruikt, laat geen tv's op stand-by staan; trek de stekker van hun gsm-laders uit het stopcontact wanneer ze niet worden gebruikt".
[077]	Moderne opladers voor mobiele telefoons verbruiken, als ze in het stopcontact blijven zitten terwijl de telefoon uit het stopcontact is gehaald, ongeveer een halve watt: de Maplin-meter in Fig.11.2 is niet nauwkeurig genoeg om dit vermogen te meten. Mijn dank gaat uit naar Sven Weier en Richard McMahon van de technische faculteit van de universiteit van Cambridge, die een standaard Nokia-lader hebben gemeten met een zeer nauwkeurige calorimeter. Zij ontdekten dat het apparaat 0,472 W verspilde zonder dat de telefoon was aangesloten. Ze deden andere interessante metingen: Met een volledig opgeladen telefoon aangesloten, verspilt hij 0,845 W, en in de normale modus, met een gedeeltelijk ontladen telefoon aangesloten, verspilt hij 4,146 W aan warmte. Pedanten vragen soms "hoe zit het met het reactief vermogen van de lader?" Dat is een technisch foefje, niet echt de tijd waard. Voor de goede orde: Ik heb het reactief vermogen gemeten (met een slordige meter) en vond ongeveer 2 VA. Met een vermogensverlies op het nationale net van 8%, bereken ik het vermogensverlies door blindvermogen op 0,16W. Als je belt, heeft de mobiele telefoon 1W nodig.
	Verdere literatuur: Kuehr (2003)

12 golven

Golfenergie

Golven

Als golfslagenergie hoopvolle mogelijkheden opent voor een land, dan moet het Engeland of Ierland zijn - aan de ene kant geflankeerd door de Atlantische Oceaan en aan de andere kant door de Noordzee.



Fig.12.1: Een Pelamis golfenergiecollector is een zeeslang met vier secties. Hij is met de neus naar de inkomende golven gericht. De golven buigen de slang en deze bewegingen drijven hydraulische generatoren aan. Het piekvermogen van een slang is 750 kW. In goede Atlantische omstandigheden kan een slang een gemiddeld vermogen van 300 kW leveren. Foto van Pelamis Wave Power [www-pelamiswave-Com](http://www.pelamiswave-Com) (404)



Laten we eerst duidelijk zijn over waar golven vandaan komen: Zon creëert wind en wind creëert golven.

Veel van het zonlicht dat op onze planeet valt, verwarmt de oceanen. Het verwarmde water verwarmt de luchtlagen erboven, waardoor waterdamp ontstaat. De verwarmde lucht stijgt op en koelt daarbij af, en het water condenseert uiteindelijk

weer tot wolken en regen. Op het hoogste punt wordt de lucht verder afgekoeld door de ijzige duisternis van de ruimte. De koude lucht zakt weer. Deze grote circulatiepomp op zonne-energie drijft de lucht rondom aan in grote convectierollen. Vanaf het oppervlak gezien, produceren deze convectierollen wind. Wind is tweedehands zonne-energie. Als de wind over het water waait, creëert hij golven. Golven zijn als het ware derdehands zonne-energie (golven die op de kust slaan hebben niets te maken met de getijden).

Op open zee ontstaan golven telkens wanneer de windsnelheid hoger is dan ongeveer 0,5 m/s. De kammen van de golven verplaatsen zich op die manier. De top van de golven beweegt ongeveer even snel als de wind die ze heeft opgewekt, en in dezelfde richting. De golflengte (de afstand tussen de golftoppen) en de periode (de tijd tussen twee golftoppen) hangen ook af van de windsnelheid. Hoe langer de wind waait en hoe groter het overspoelde gebied is, hoe groter de hoogte van de golven die de wind opstuwt. [083] Aangezien op de Atlantische Oceaan de wind hoofdzakelijk van west naar oost waait, zijn de golven op de Europese Atlantische kust vaak bijzonder hoog. (De golven aan de oostkust van Engeland zijn gewoonlijk veel kleiner, zodat mijn raming van het potentieel voor beschikbare golfslagenergie zal worden toegespitst op de bronnen in de Atlantische Oceaan).

Golven hebben een goed geheugen en blijven dagenlang in dezelfde richting lopen, zelfs nadat de wind is gaan liggen, totdat zij op een obstakel stuiten. In zeeën waar de windrichting dikwijls verandert, vormen golven die op verschillende dagen ontstaan, een gesuperponeerde (overlappende) puinhoop door in verschillende richtingen te lopen.

Wanneer golven met een bepaalde bewegingsrichting objecten raken die hun energie absorberen - zoals een keten van eilanden met zandstranden - wordt de zee achter het object rustiger. De voorwerpen werpen een schaduw en er zit minder energie in de golven als ze verder reizen. In tegenstelling tot de zon, die energie levert per oppervlakte-eenheid, leveren golven energie per lengte-eenheid kustlijn. Je kunt niet van twee walletjes eten. Je kunt geen golfenergie verzamelen twee mijl uit de kust en één mijl uit de kust verzamelen. Of toch, je kan het proberen, maar de twee-



Foto door Terry Caver



mijls faciliteit zal energie absorberen die zou zijn gegaan naar de de faciliteit van 1 mijl, en het zal niet worden vervangen. De afstand die nodig is voor wind om om grote golven op te blazen is duizenden mijlen.

We kunnen een bovengrens bepalen voor het maximale vermogen dat door deze golven kan worden opgewekt door het inkomende vermogen per lengte-eenheid van de kustlijn te bepalen en dat te vermenigvuldigen met de lengte van de kustlijn. Wij gaan voorbij aan de vraag welk mechanisme deze macht zou kunnen verzamelen en vragen ons eerst af hoeveel macht het eigenlijk is.

Het vermogen van Atlantische golven is gemeten: het bedraagt ongeveer 40 kW per meter kustlijn. Dat klinkt als veel. Als iedereen een meter kust zou bezitten en de volledige 40 kW zou kunnen aftappen, zou dat genoeg stroom zijn om aan de moderne vraag te voldoen. Onze bevolking is daar echter te groot voor. Er is niet genoeg Atlantische kustlijn voor iedereen om er een meter van te hebben.

Zoals de kaart hierboven op bladzijde 82 laat zien, heeft Engeland ongeveer 1000 km Atlantische kustlijn (1 miljoen meter), wat neerkomt op 1/60 meter per persoon. Dat geeft een golfvermogen van 16 kWh/d per persoon. Als we al die energie eruit zouden halen, zou de Atlantische Oceaan plat als een molensteen op de kust liggen. In de praktijk kan geen enkel systeem al dat vermogen onttrekken, en daar komt nog bij dat er verliezen zijn bij het omzetten van de mechanische in elektrische energie. Veronderstel dat de briljante golfmachines 50%-efficiënt inkomende golfenergie kunnen omzetten in elektriciteit, en dat wij dergelijke golfmachines 500 km langs de Atlantische kust kunnen opstellen. Dat zou betekenen dat we 25% kunnen benutten van wat theoretisch mogelijk is. Dat is 4 kWh/d per persoon. Zoals gewoonlijk heb ik enkele vrij extreme veronderstellingen gemaakt om de groene stapel te laten groeien - ik verwacht dat de veronderstelling dat de helft van de Atlantische kust zou kunnen worden uitgerust met golfslagabsorbers voor veel lezers vrij utopisch klinkt.

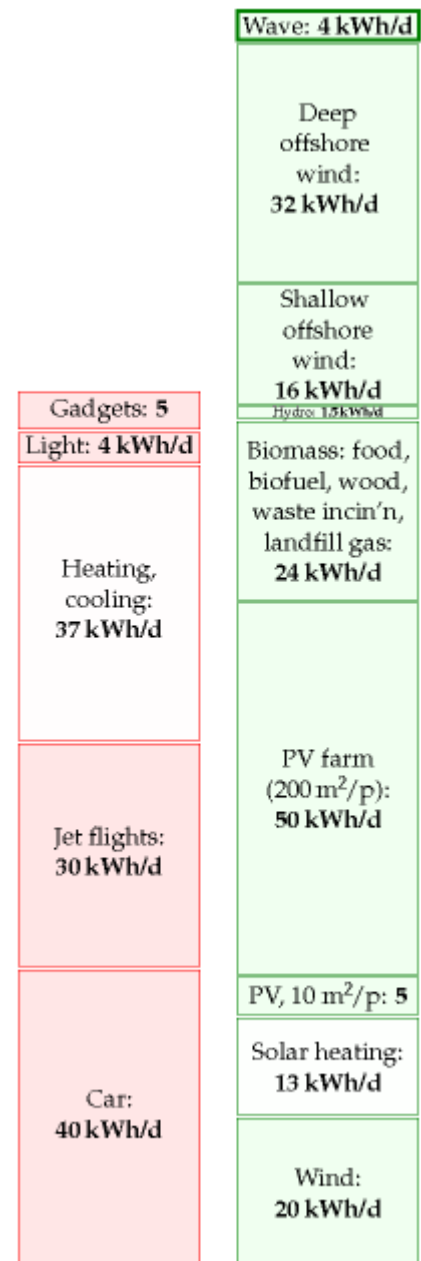


Fig.12.2: Golven

Hoe verhouden deze cijfers zich tot de technologie van vandaag? Er zijn momenteel drie golfslagmachines actief in diep water: Drie Pelamis golfenergiecollectoren (Fig.12.1), gebouwd in Schotland en opgesteld voor de kust van Portugal. Er zijn geen gegevens gepubliceerd over de werkelijke werking, maar de fabrikanten van de Pelamis ("die in de eerste plaats zijn geoptimaliseerd voor levensduur in plaats van energie-efficiëntie") verwachten 6 kW/m te kunnen halen uit 40 van hun "zeeserpenten" op een golfpark van 2 km. Als we deze getallen meenemen in onze bovenstaande berekening, zouden we de stroom die we opwekken van onze 500 km moeten terugbrengen tot 1,2 kWh/d per persoon. **[084]** Hoewel golfenergie nuttig kan zijn voor kleine nederzettingen op afgelegen eilanden, vermoed ik dat deze technologie geen rol van betekenis kan spelen bij de oplossing van het Engelse energieprobleem.

Wat weegt een pelamis, hoeveel staal verbruikt hij? Een slang met een maximaal vermogen van 750 kW weegt 700 ton, inclusief 350 ton ballast. Het is gemaakt van 350 ton staal. Dat is een gewicht/vermogen-verhouding van ongeveer 500 kg per kW (piek). Laten we dat eens vergelijken met het materiaalverbruik van off-shore windmolens: Die wegen 500 ton bij een maximaal vermogen van 3 MW, wat neerkomt op een verhouding van 170 kg per kW, een derde van de asmachine. Pelamis is een eerste prototype; vermoedelijk kan deze verhouding aanzienlijk worden verbeterd met verdere investeringen en ontwikkelingen in de schachttechnologie.

[085] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[082]	Op open zee ontstaan golven telkens wanneer de windsnelheid groter is dan ongeveer 0,5m/s. 73 Q16 ¹⁶ Golven ontstaan wanneer de windsnelheid groter is dan ongeveer 0,5m/s. De golftoppen bewegen met ongeveer de snelheid van de wind die ze veroorzaakt. De eenvoudigste theorie van golfproductie (Faber, 1995, blz. 337) suggereert dat (voor kleine golven) de golftoppen zich verplaatsen met ongeveer de helft van de snelheid van de wind die ze veroorzaakt. Empirisch is echter vastgesteld dat, hoe langer de wind waait, hoe langer de golflengte van de aanwezige dominante golven wordt, en hoe groter hun snelheid. De karakteristieke snelheid van volledig ontwikkelde zeeën is bijna precies gelijk aan de windsnelheid 20 meter boven het zeeoppervlak (Mollison, 1986).
[083]	Golven aan de oostkust van Engeland zijn gewoonlijk veel kleiner - De golven aan de oostkust van de Britse eilanden zijn gewoonlijk veel kleiner. Terwijl het golfvermogen in Lewis (Atlantische Oceaan) 42 kW/m bedraagt, zijn de vermogens in de plaatsen aan de oostkust: Peterhead: 4 kW/m; Scarborough: 8 kW/m; Cromer: 5 kW/m. Bron: Sinden (2005). Sinden zegt: "De Noordzee-regio kent een zeer laag energetisch golfklimaat."
[083]	Het vermogen van Atlantische golven is gemeten: het is ongeveer 40 kW per meter kustlijn 74 Het vermogen van Atlantische golven is 40 kW per meter blootgestelde kustlijn. (In hoofdstuk F wordt uitgelegd hoe we dit vermogen kunnen schatten aan de hand van een paar feiten over golven). Dit getal heeft een stevige basis in de literatuur over Atlantisch golfvermogen (Mollison et al., 1976; Mollison, 1986, 1991). Van Mollison (1986), bijvoorbeeld: "de grootschalige hulpbron van het noordoostelijk deel van de Atlantische Oceaan, van IJsland tot Noord-Portugal, heeft een nettobron van 40-50MW/km, waarvan 20-30MW/km potentieel economisch winbaar is." Op elk punt in de open oceaan kunnen drie vermogens per lengte-eenheid worden onderscheiden: het totale vermogen dat in alle richtingen door dat punt passeert (gemiddeld 63 kW/m bij de Isles of Scilly en 67 kW/m bij Uist); het nettovermogen dat wordt opgevangen door een gerichte collector die in de optimale richting is georiënteerd (respectievelijk 47 kW/m en 45 kW/m); en het vermogen per kusteenheid, waarbij rekening wordt gehouden met de scheefstand tussen de optimale oriëntatie van een gerichte collector en de kustlijn (in Portugal bijvoorbeeld is de optimale oriëntatie naar het noordwesten gericht en de kustlijn naar het westen).
[083]	In de praktijk kan geen enkel systeem al het vermogen onttrekken. - Praktische systemen zullen er niet in slagen al het vermogen te onttrekken, en een deel van het

16) Opmerking over – nog – niet vertaalde gedeelte in Duitse versie – In Nederlandse versie niet van toepassing

Q16 Om het vertaalproces te vereenvoudigen, zijn de meeste noten en verwijzingen (nog) niet in het Duits vertaald. Om de tekstpassage in de Duitse tekst waarnaar de noot verwijst te kunnen identificeren, zijn hier de bladzijde en het citaat aangegeven (zoals voorheen in rood). De originele Engelse tekst van de nota volgt hierna. Deze begint ook met een paginanummer, maar dit verwijst naar de (andere) nummering in de oorspronkelijke tekst. (Een liggend streepje betekent hier dat het paginanummer identiek is aan dat van de voorgaande noot). Dit wordt gevolgd door het overeenkomstige Engelse tekstcitaat, gevolgd door verdere aantekeningen of broninformatie van de auteur.

	vermogen zal onvermijdelijk verloren gaan bij de omzetting van mechanische energie in elektriciteit. De eerste op het net aangesloten golfmachine van het VK, de Limpet op Islay, is een treffend voorbeeld van deze verliezen. Toen de machine werd ontworpen, werd de omzettingsefficiëntie van golfenergie naar netstroom geraamd op 48% en werd een gemiddeld vermogen van 200 kW voorspeld. Door verliezen in het opvangsysteem, de vliegwielen en de elektrische componenten bedraagt het werkelijke gemiddelde vermogen echter 21 kW - slechts 5% van het voorspelde vermogen (Wavegen, 2002).

13 voedsel

Voedsel en landbouw

Moderne landbouw is het gebruik van land om aardolie om te zetten in voedsel.

Albert Bartlett.

In hoofdstuk 6 hebben we al besproken hoeveel hernieuwbare energie door planten kan worden geproduceerd, hier bespreken we hoeveel energie momenteel wordt verbruikt om ons ons dagelijks brood te geven.

Een matig actieve persoon van 65 kg lichaamsgewicht heeft dagelijks voedsel nodig met een energie-inhoud van ongeveer 2600 "calorieën" Q17¹⁷. De term "calorie" staat in voedingskringen eigenlijk voor 1 kilocalorie (1 kcal), of 1000 calorieën volgens de chemische definitie. 2600 "calorieën" per dag staat gelijk aan ongeveer 3 kWh per dag. Het grootste deel van deze energie verlaat het lichaam in de vorm van warmte, zodat een doorsnee persoon met iets meer dan 100 W, vergelijkbaar met een gloeilamp, fungeert als een ruimteverwarmer. Zet 10 mensen in een kleine koude kamer en je kunt de 1kW ventilatorkachel uitzetten.



Afb.13.1: Een salade Nicoise

Minimum: 3 kWh/d



Fig.13.2: Minimaal energieverbruik van een persoon

Hoeveel energie gebruiken we eigenlijk om die 3 kWh per dag te krijgen? Als we ons perspectief verruimen tot de onvermijdelijke kosten van voedselproductie, is onze energievoetafdruk aanzienlijk groter. Het hangt ervan af of we veganist, vegetariër of vleeseter zijn.

De veganist heeft de kleinst mogelijke voetafdruk: 3 kWh per dag van de planten die hij eet.

De energiekosten van melk drinken

¹⁷)Q17 Het oude "calorie" is in Duitstalige publicaties al grotendeels vervangen door de SI-eenheid joule (1 kcal ≈ 4,2 kJ), zelfs in de levensmiddelensector. / **Ned. waarde te hoog!**

Ik hou van melk. Als ik elke dag een glas melk drink, hoeveel energie kost dat dan? Een gemiddelde melkkoe geeft 16 liter melk per dag. Voor mijn dagelijks glas melk (1/2 liter) heb ik dus 1/32 koe nodig. Ik hou ook van kaas. En er is ongeveer 9 kg melk nodig om 1 kg Ierse cheddar te maken. Om elke dag 50 gram kaas te eten, is dus 450 gram melk nodig. OK: Dus voor mijn melk- en kaasconsumptie heb ik 1/16e koe nodig. Wat is dan het energieverbruik van een koe? Als een koe van 450 kg per lichaamsgewicht evenveel energie nodig heeft als een mens (die met 65 kg immers 3 kWh per dag verbrandt), dan heeft de koe 21 kWh/d nodig. Voel je je ongemakkelijk bij het extrapoleren van mensen naar koeien? Laten we de gegevens eens bekijken: www.dairyaustralia.com zegt dat voor het houden van een koe van 450 kg 85 MJ/d nodig is, wat neerkomt op 24 kWh/d. Geweldig, onze benadering zat er niet ver naast! Dus mijn 1/16e deel van de koe vereist **1,5 kWh per dag**. Daarbij is geen rekening gehouden met andere energiekosten, zoals voor het melken van de koe, het maken van kaas van de melk, of het vervoer van melk en kaas van de koe naar mij.

087] Sommige van deze kosten komen aan de orde in [hoofdstuk 15](#), wanneer we het hebben over vrachtvervoer en supermarkten.

Milk, cheese: 1.5 kWh/d

Fig.13.3: *Melk en kaas*

Eieren

Een legkip eet ongeveer 110 g kippenvoer per dag. Uitgaande van een metaboli-seerbaar energiegehalte van kippenvoer van 3,3 kWh per kg, komt dit neer op een energiebehoefte van 0,4 kWh per dag per kip. Legkippen produceren gemiddeld 290 eieren per jaar. Voor het eten van twee eieren per dag is 1 kWh/d nodig. Het ei zelf heeft 80 kcal, dat is ongeveer 0,1 kWh. Vanuit energie-oogpunt is de eierproductie dus 25% efficiënt.

Eggs: 1 kWh/d

Fig.13.4: *Twee eieren per dag*

De energiekosten van vlees

Laten we zeggen dat een enthousiaste vleeseter een half pond vlees per dag consumeert, of 227 g (dat is het gemiddelde voor Amerikanen). Om de energie te schatten die nodig is om slachtdieren groot te brengen en vet te mesten, moeten we weten hoe lang deze dieren leven en energie verbruiken. Kip, varkensvlees, of rundvlees?

Kip?

Elke kip die je eet, liep ongeveer 50 dagen rond te tokkelen. Om regelmatig een half pond kip per dag te eten, moeten er dus 25 pond vleeskippen rondrennen die klaar zijn om opgegeten te worden. En die 25 pond verbruiken energie.

Varken?

Varkens leven langer - misschien 400 dagen van geboorte tot ham, dus dat is de reden waarom het regelmatig consumeren van een half pond varken per dag ongeveer 200 pond aan levende varkens vereist die wachten om te worden geslacht.

Rundvlees?

De productie van rundvlees vergt de langste aanlooptijd. Het duurt ongeveer 1000 dagen koeienleven om een biefstuk te worden. Voor de regelmatige consumptie van een half pond rundvlees is dus 500 pond levend rundvlees in koeienweiden nodig.

Fig.13.5: *Vlees eten kost meer energie omdat we ook de dieren moeten voeden die in de rij staan om later te worden opgegeten.*

Carnivory: 8 kWh/d



Om één enkel cijfer te krijgen uit al deze benaderingen, nemen we aan dat het halve pond vlees per dag bestaat uit gelijke delen kip, rundvlees en varkensvlees. Dit consumptiepatroon vereist een voortdurende veeteeltproductie van 8 pond kip, 70 pond varkensvlees en 170 pond rundvlees. Dat is in totaal 110 kg vlees, of 170 kg dier (omdat ongeveer 2/3 van het levend gewicht van een dier tot vlees kan worden verwerkt). En nu, als die 170 kg dieren een vergelijkbare energiebehoefte hebben als mensen (die met hun 65 kg immers 3 kWh/d verbranden), dan geeft dat een energiestroom van

$$170 \text{ kg} \times \frac{3 \text{ kWh/d}}{65 \text{ kg}} \approx 8 \text{ kWh/d.}$$

Ook hier heb ik de fysiologische analogie gebruikt dat "dieren net mensen zijn"; voor een nauwkeuriger schatting van de kippenproductie, zie de noten aan het eind van dit hoofdstuk. Laat maar, ik wilde alleen de orde van grootte schatten, en dat is wat we hier hebben. [088] De energie die nodig is om een typische consumentenmaaltijd van groenten, zuivel, eieren en vlees te produceren is $1,5 + 1,5 + 1 + 8 = 12 \text{ kWh per dag}$. De dagelijkse voedingsbalans van dit dieet is 1,5 kWh uit groenten, 0,7 kWh uit zuivelproducten, 0,2 kWh uit eieren, en 0,5 kWh uit vlees - een totaal van 2,9 kWh per dag.

Dit cijfer omvat niet het aandeel van het energiegebruik dat verband houdt met de landbouw, het vetmesten, de verwerking, de koeling en het vervoer van het voedsel. In [hoofdstuk 15](#) zullen wij een raming maken van sommige van deze kosten.

Geeft deze berekening ons een argument om vegetarisme te verkiezen om energie-redenen? Dat hangt af van waar de dieren opgroeien. Neem de steile heuvels en bergen van Wales als voorbeeld. Kan het land voor iets anders worden gebruikt dan voor begrazing? Of u gebruikt deze gebieden voor de schapenhouderij, of ze dragen niets bij aan de voedselvoorziening van de mens. Je kunt deze natuurlijke groene stroken dus beschouwen als onderhoudsvrije biobrandstofplantages, en de schapen als geautomatiseerde, zichzelf replicerende biobrandstofplantages. Het energieverlies van zonlicht naar schapenvlees is groot, maar er is waarschijnlijk geen efficiëntere manier om zonne-energie te verzamelen in dergelijke onherbergzame gebieden. (Ik weet niet of dit argument wel steek houdt voor de schapenhouderijen in Wales: bij slecht weer worden de Welshe schapen naar lager gelegen weiden gebracht en wordt hun voeding aangevuld met soja en andere voeders die met energie-intensieve meststoffen worden geteeld. Wat zijn de werkelijke energiekosten daar? Ik weet het niet.) Soortgelijke argumenten kunnen worden aangevoerd ter verdediging van de vleesconsumptie op de steppen van Afrika of Australië, of voor de melkconsumptie in India, waar miljoenen koeien worden gevoed met bijprodukten van de rijst- en maïsteelt.



Fig.13.6: *Oogsten van energiegewassen voor voedsel*

Anderzijds, wanneer dieren in kooien worden gehouden en worden gevoerd met graan dat mensen hadden kunnen eten, daar is het ontegenzeggelijk energie-efficiënter om de hen of zeug ertussen uit te laten en het graan rechtstreeks aan de mensen te voeren.

Meststoffen en andere energiekosten van de landbouw

De energie die in Europese meststoffen wordt gestoken, bedraagt ongeveer **2 kWh per dag per persoon**. Volgens een publicatie van de DEFRA door de Universiteit van Warwick werd in de Engelse landbouw **0,9 kWh per dag per persoon** besteed aan tractoren en machines, verwarming (vooral kassen), verlichting, ventilatie en koeling.

089] De energiekosten van Minka, Rex en Flicka

Huisdieren. Bent u de slaaf van een hond, kat of paard?

Er zijn waarschijnlijk 8 miljoen katten in Engeland. Laten we zeggen dat je voor één van hen zorgt. Minka's energiekosten? Als ze 50 gram vlees per dag eet (kip, varkensvlees, rundvlees), komt dat volgens onze berekening uit het laatste deel neer op **2 kWh energie per dag**. Een vegetarische kat zou goedkoper zijn.

Als uw hond Rex 200 g vlees per dag eet, plus koolhydraten à 1 kWh per dag, dan verbruikt zijn voeding **9 kWh per dag**.

De merrie Flicka weegt 400 kg en heeft **17 kWh per dag** nodig.



Fig.13.7: De energie in het voedsel van huisdieren

Mythen en legenden

Ik heb horen zeggen dat de energie-voetafdruk van ons voedsel zo groot is dat "het beter is te rijden dan te lopen".

Of dat waar is, hangt af van wat je eet. Natuurlijk kun je voedsel vinden waarvan de fossiele energievoetafdruk groter is dan de voedingswaarde voor de mens. Een zak chips bijvoorbeeld heeft een ingevoerde energie uit fossiele brandstoffen van 1,4 kWh per kWh voedingswaarde. De in vlees ingebrachte energie is hoger. Volgens een studie van de universiteit van Exeter heeft een typische levensmiddelenmix ongeveer 6 kWh ingevoerde energie per kWh voedingswaarde.

Om te weten te komen of een autorit of een wandeling meer energie verbruikt, moeten we de transportefficiëntie van beide vervoerswijzen schatten. De typische auto uit hoofdstuk 3 had 80 kWh per 100 km nodig. Een wandeling daarentegen kost 3,6 kWh per 100 km - 22 keer minder. Dus als je uitsluitend leeft van voedsel met een voetafdruk van meer dan 22 kWh per kWh voedingswaarde, ja, dan is het energieverbruik van een voertuig dat je van A naar B brengt lager dan wanneer je de reis op eigen kracht aflegt. Maar als je een gemiddeld dieet volgt (3 kWh per kWh) dan is "beter rijden dan lopen" een mythe. Lopen kost ongeveer een kwart van de energie.

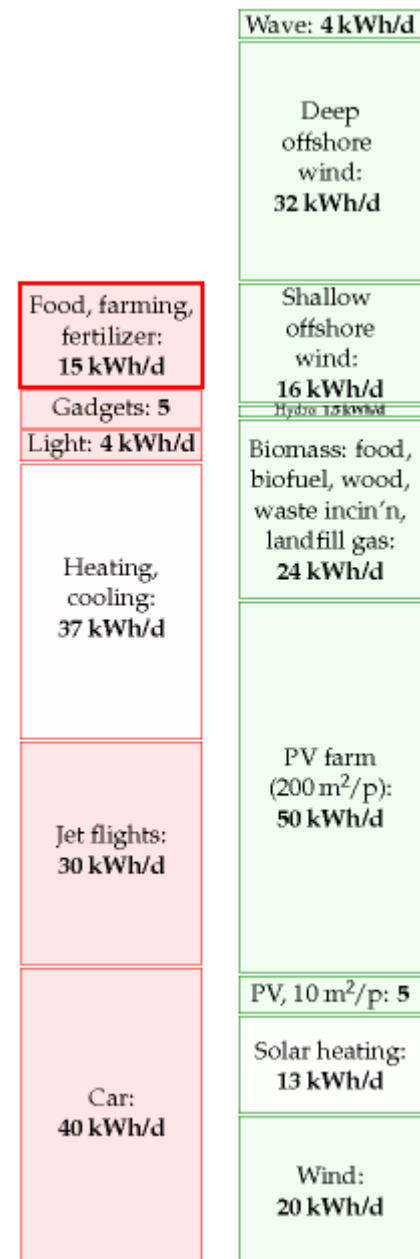


Fig.13.8: Voedsel en landbouw

[090] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[086]	Een melkkoe geeft gemiddeld 16 liter melk per dag. Een melkkoe produceert gemiddeld 16 liter melk per dag. Er zijn 2,3 miljoen melk-koeien in het Verenigd Koninkrijk, die elk ongeveer 5900 liter per jaar produceren. De helft van alle door koeien geproduceerde melk wordt verkocht als vloeibare melk. www-ukagriculture.com , www-vegsoc.org/info/cattle.html
[087]	Het duurt ongeveer 1000 dagen van het leven van een koe, 77 Het duurt ongeveer 1000 dagen om een biefstuk te maken. 33 maanden van concep-tie tot slachthuis: 9 maanden dracht en 24 maanden opfok. www-shabdenparkfarm.-com/farming/cattle.htm
[087]	Kippen Een volgroeide (20 weken oude) leghen weegt 1,5 of 1,6 kg. Zijn voeder heeft een energie-inhoud van 2850 kcal per kg, wat neerkomt op 3,3 kWh per kg, en zijn voeder-verbruik stijgt tot 340 g per week wanneer hij 6 weken oud is, en tot 500 g per week wanneer hij 20 weken oud is. Eens aan de leg, bedraagt de typische voederbehoefte 110 g per dag. Het voer van vleeskuikens [091] heeft een energie-inhoud van 3,7 kWh per kg. Het energieverbruik bedraagt 400-450 kcal per dag per kip (0,5 kWh/d per kip), waarbij 2 kg een typisch lichaamsgewicht is. Een vleeskip van 2,95 kg verbruikt in to-taal 5,32 kg voer [5h69fm]. De belichaamde energie van een vleeskip is dus ongeveer 6,7 kWh per kg dier, of 10 kWh per kg gegeten vlees. Als ik dit getal had gebruikt in plaats van mijn ruwe schatting, zou de energiebijdrage van de kip een beetje hoger zijn uitgevallen. Maar aangezien de energievoetafdruk van het gemengde vleesdieet wordt gedomineerd door het rundvlees, maakt het eigenlijk niet uit dat ik de kippen heb on-derschat. Bronnen: Subcommittee on Poultry Nutrition, National Research Council (1994), www-nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923 , MacDonald (2008), en www-statistics.gov.uk/statbase/datasets2.asp .
[087]	Laten we aannemen dat het halve pond vlees per dag bestaat uit gelijke delen kip, rundvlees en varkensvlees. 77 Laten we aannemen dat u een half pond (227 g) vlees per dag eet, bestaande uit ge-lijke hoeveelheden kip, varkensvlees en rundvlees. Dit komt in de buurt van de gemid-delde vleesconsumptie in Amerika, die 251 g per dag bedraagt - bestaande uit 108 g kip, 81 g rundvlees en 62 g varkensvlees (MacDonald, 2008).
[088]	De energie die in Europese meststoffen wordt gestoken, bedraagt ongeveer 2 kWh per dag per persoon. 78 De opgenomen energie in Europa's meststoffen is ongeveer 2 kWh per dag per per-soon. In 1998-9 gebruikte West-Europa 17,6Mt meststoffen per jaar: 10Mt nitraten, 3,5Mt fosfaten en 4,1Mt potas. Deze meststoffen hebben een energievoetafdruk van respectievelijk 21,7, 4,9 en 3,8 kWh per kg. Als we deze energie verdelen over 375 miljoen mensen, vinden we een totale voetafdruk van 1,8 kWh per dag per persoon. Bronnen: Gellings en Parmenter (2004), International Fertilizer Industry Association [5pwojp].
[088]	werd 0,9 kWh per dag per persoon gebruikt in de Engelse landbouw.-. UK agriculture consumed an energy of 0.9 kWh per day per person in 2005. Source:

	Warwick HRI (2007)
[089]	Een zak chips heeft bijvoorbeeld een input-energie uit fossiele brandstoffen van 1,4 kWh per kWh voedingswaarde. 79 Een zak chips heeft een belichaamde energie van 1,4 kWh fossiele brandstof per kWh opgegeten chemische energie. Ik heb deze energie geschat op basis van de koolstofvoetafdruk van een zak chips: 75 g CO₂ voor een standaard zakje van 35 g [5bj8k3]. Van deze voetafdruk houdt 44% verband met de landbouw, 30% met de verwerking, 15% met de verpakking, en 11% met het vervoer en de verwijdering. De chemische energie die aan de consument wordt geleverd, bedraagt 770 kJ. Dit voedsel heeft dus een koolstofvoetafdruk van 350 g per kWh. Ervan uitgaande dat het grootste deel van deze koolstofvoetafdruk afkomstig is van fossiele brandstoffen (250 g CO₂ per kWh), is de energievoetafdruk van de chips 1,4 kWh fossiele brandstof per kWh opgegeten chemische energie.
[089]	een typische voedselmix heeft ongeveer 6 kWh ingevoerde energie per kWh voedingswaarde.- Een doorsnee dieet heeft een belichaamde energie van ruwweg 6 kWh per gegeten kWh. Coley (2001) schat dat de belichaamde energie in een doorsnee dieet 5,75 maal de afgeleide energie bedraagt. Lopen heeft een CO voetafdruk van 42 g/km; fietsen, 30 g/km. Ter vergelijking: een gemiddelde auto heeft een uitstoot van 183 g/km.
[089]	Voor een wandeling daarentegen is 3,6 kWh per 100 km nodig -. Lopen verbruikt 3,6 kWh per 100 km. Een lopende mens gebruikt in totaal 6,6 kWh per 100 km [3s576h]; we trekken de rust-energie eraf om de energie-voetafdruk van het lopen te krijgen (Coley, 2001).
	Verdere lectuur: Weber en Matthews (2008).

14 getijden

Getijdenenergie

Getijden

De maan en de aarde dansen ingewikkelde pirouettes rond de zon. Samen draaien zij eenmaal per jaar om de zon en tegelijkertijd draaien zij om de 28 dagen om elkaar heen. De maan draait ook eens in de 28 dagen om zichzelf heen, zodat zij altijd hetzelfde gezicht toont aan haar danspartner, de aarde. De prima donna Aarde geeft dit compliment niet terug; zij draait één keer per dag. De dans wordt bijeengehouden door de zwaartekracht: elk massadeeltje in de Aarde, de Maan en de Zon wordt naar elk ander massadeeltje in de Aarde, de Maan en de Zon getrokken. De som van deze krachten is bijna precies wat nodig is om deze cirkeldans gaande te houden. Maar er zijn zeer kleine onevenwichtigheden tussen deze gravitatiekrachten en de krachten die nodig zijn om de dansbeweging in stand te houden. Deze onevenwichtigheden zijn de oorzaak van getijden.

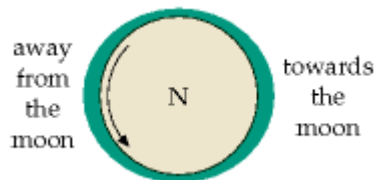


Fig.14.1: Een oceaan rond een biljartbal Aarde. Gezicht op de noordpool, de maan staat 60° naar rechts. De aarde draait eenmaal per dag rond in de rugbybalvormige schaal van water. De oceanen worden naar de Maan toe en van de Maan af vervormd omdat de zwaartekracht van de Maan niet voor 100% overeenkomt met de middelpuntzoekende krachten die nodig zouden zijn om de draaibeweging van de Maan en de Aarde rond het gemeenschappelijke zwaartepunt in stand te houden. Een waarnemer op de evenaar (draaiend in de richting van de pijl) ervaart twee hoogwaters en twee laagwaters per dagelijkse omwenteling.

De onevenwichtigheden in verband met de draaiende beweging van de Maan en de Aarde rond elkaar zijn ongeveer drie keer zo groot als die van de langzamere dans van de Aarde rond de Zon, en daarom varieert de hoeveelheid getijdenbeweging (het getijdenverschil) met de maanstand, afhankelijk van het feit of de Zon en de Maan in dezelfde of in tegengestelde richting werken. Bij volle en nieuwe maan (wanneer de maan en de zon in elkaars verlengde staan) worden de onevenwichten sterker en het daaruit voortvloeiende grote getijdenverschil wordt springtij genoemd. Tijdens de tussenliggende maansikels worden de onevenwichtigheden gedeeltelijk opgeheven en is het getijdenverschil kleiner. Deze lagere getijden worden doottij (neap tides) genoemd. Springtij is ongeveer twee keer zo hoog als doottij. Springtij ligt ongeveer tweemaal zo ver boven het gemiddelde zeeniveau als doottij, springtij ligt ongeveer tweemaal zo laag onder het gemiddelde zeeniveau als

doodtij; ook de getijdenstromingen zijn bij springtij tweemaal zo hoog als bij doodtij.



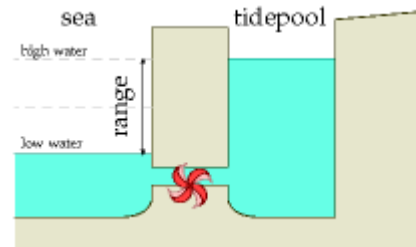
Fig.14.2: *Getijdenbassin en getijdenmolen van Woodbridge. Foto met dank aan Ted Evans.*

Waarom is het twee keer per dag vloed en twee keer per dag eb? Als de aarde perfect bolvormig was, een gladde biljartbal omgeven door oceaan, zou het water door de getijdenwerking van de Aarde-Maanbeweging een beetje naar de Maan toe en van de Maan af vervormen, tot een lichte rugbybalvorm (**Fig.14.1**). Een bewoner aan de evenaar van deze biljartbal-aarde, die zich eenmaal per dag in deze watercocon verplaatst, zou het water tweemaal per dag op en neer zien gaan: Hoog water zou hij één keer onder de "neus" van de rugbybal zien en een tweede keer onder de "staart". Deze simplistische uitleg staat een beetje ver van de werkelijkheid. In werkelijkheid is de aarde niet glad, noch is zij gelijkmatig door water omgeven (zoals u misschien hebt opgemerkt). De twee waterbuiken kunnen niet eenmaal per dag om de aarde razen omdat de continenten hen in de weg staan. Daarom is het echte gedrag van de getijden wat ingewikkelder. In grote watermassa's, zoals de Atlantische Oceaan, vormen zich getijdenruggen en -troggen, maar die kunnen niet rond de aarde razen, dus doen ze het op één na beste: ze razen rond de omtrek van de oceaan. In de Noord-Atlantische Oceaan zijn twee bergkammen en twee troggen, die alle eens [093] per dag tegen de wijzers van de klok in om de Atlantische Oceaan cirkelen. Hier in Groot-Brittannië zien we deze Atlantische kammen en troggen niet direct - wij zijn teruggetrokken van de Atlantische Oceaan zelf, ervan gescheiden door een paar door een paar honderd mijl pierenbad, het continentaal plat. Telkens wanneer een van de bergkammen in de kern van de Atlantische Oceaan voorbijraast, stuurt hij ook een bergkam in onze pierenbadje. Op dezelfde manier, stuurt elke Atlantische trog een kleine trog in het pierenbadje. Er zitten zes uur tussen elke opeenvolgende kam en trog, $6\frac{1}{4}$ uur om precies te zijn, aangezien de tijd tussen twee maansopgangen 25 uur is, niet 24.

De snelheid waarmee de kammen en dalen reizen varieert met de diepte van het pierenbadje. Hoe ondieper het pierenbadje wordt, hoe langzamer de hoe trager de kammen en dalen bewegen en hoe groter ze worden. In de oceaan, zijn de getijden

zijn de getijden maar een twee voet hoog Q18 ¹⁸. Aangekomen in Europese estuaria, is het is het getijdenverschil vaak wel vier meter. Op het noordelijk halfrond, is de Corioliskracht (een kracht, geassocieerd met de rotatie van de aarde, die werkt alleen op bewegende voorwerpen) alle getijdenkammen en -troggen de neiging om de rechteroever te omarmen. Bijvoorbeeld, de getijden in het Engelse kanaal zijn groter aan de Franse kant. Evenzo zijn de kruinen en dalen die de Noordzee rond de Orkneys binnenkomen aan de Britse kant, naar beneden reizend naar de monding van de Theems en draaien dan linksaf naar Nederland om Denemarken.

Fig.14.3: Een kunstmatig getijdenbekken. Het vult zich bij vloed, getoond is eb. Het water wordt nu door de generator naar buiten gelaten om de potentiële energie van het water om te zetten in elektriciteit.



Getijdenenergie wordt ook wel maanenergie genoemd, omdat het vooral aan de maan te danken is dat het water zo rondstroomt. Maar het grootste deel van de getijdenenergie komt eigenlijk van de rotatie-energie van de draaiende aarde. De aarde gaat heel langzaam....

Dus hoe kunnen we getijdenenergie gebruiken en hoeveel stroom kunnen we eruit halen?

Tabel.14.4: Vermogensdichtheid (vermogen per oppervlakte-eenheid) van een getijdenbekken, met opkomende en neergaande getijden.

Getijdengebied	Vermogensdichtheid
2 m	1 W/m ²
4 m	3 W/m ²
6 m	7 W/m ²
8 m	13 W/m ²

[094]

Ruwe vermogensschatting van getijdenenergie

Een getijdencentrale wordt voorgesteld als een bekken dicht bij de zee, met een waterrad dat draait naarmate het bekken zich vult of leegloopt (Fig.14.2 en Fig.14.3). Bijlage G laat zien hoe het beschikbare vermogen bij zo'n getijdepoel kan worden geraamd. Uitgaande van een hoogte van 4 m, typisch voor veel Europese kusten, bedraagt het maximaal haalbare vermogen van een kunstmatige poel, die bij vloed snel volloopt en bij eb weer snel leegloopt, en waarvan de turbine in beide stroomrichtingen vermogen opwekt, 3 W/m². Dat is dezelfde vermogensdichtheid als off-

18) Q18 Een voet is 30,48 cm.

shore windmolenparken. We weten al dat windmolenparken een landoppervlakte moeten hebben, willen ze een significante bijdrage leveren aan de energievoorziening. Evenzo moeten getijdenbekkens, willen zij een significante bijdrage leveren, van een vergelijkbare omvang zijn als Engeland.

Gelukkig heeft Engeland al zo'n natuurlijk getijdenbekken: de Noordzee.

(Fig.14.5). Als we generatoren op geschikte plaatsen zetten, kunnen we een aanzienlijke hoeveelheid stroom winnen. De generatoren kunnen worden ontworpen als onderwater windmolens. Omdat de dichtheid van water ongeveer 1000 maal groter is dan die van lucht, is de kracht van een waterstroom ook 1000 maal groter dan die van wind met dezelfde snelheid. We komen zo terug op de getijdefarms, maar laten we eerst eens bespreken hoeveel getijdenenergie er elke dag in Engeland wordt opgewekt.

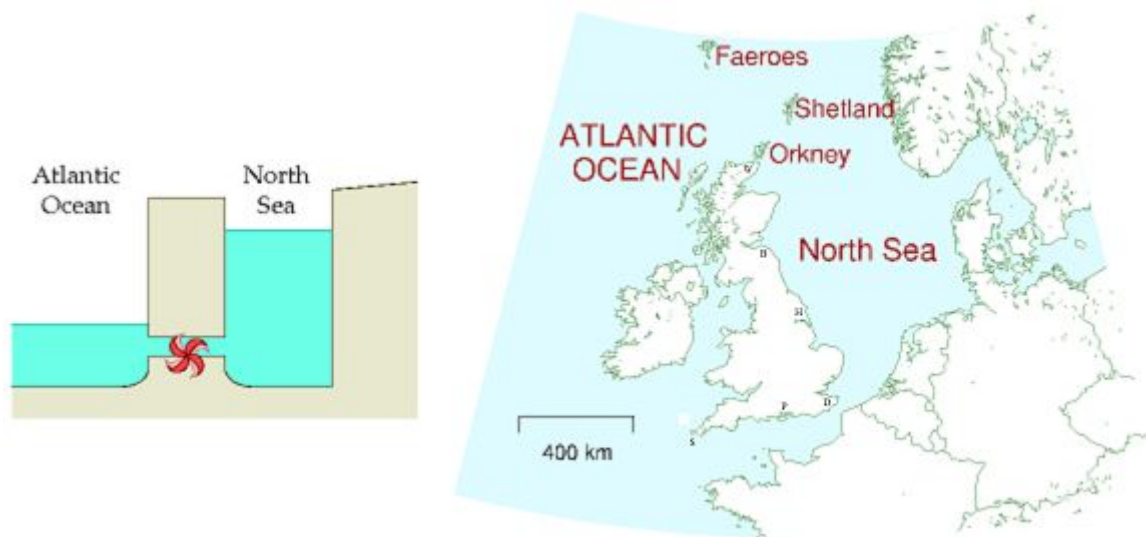


Fig.14.5: De Britse eilanden bevinden zich in een gelukkige positie: de Noordzee fungeert als een natuurlijk getijdenbekken, met grote waterstromen die er tweemaal per dag in en uit stromen.

Inkomende getijdenkracht

De getijden rond Engeland zijn echte vloedgolven - niet zoals tsunami's, die ook vaak vloedgolven worden genoemd maar niets met getijden te maken hebben. Laten we een vloedgolf volgen vanaf de Atlantische Oceaan. Het tijdstip van de hoogste waterstand komt steeds later naarmate we oostwaarts gaan langs het Kanaal van de Scilly-eilanden naar Portsmouth naar Dover. [095] De top van de vloedgolf loopt met ongeveer 70 km/u het Kanaal op (De top van de golf loopt sneller dan het water zelf, net zoals normale golven op zee sneller lopen dan het water stroomt). Tegelijkertijd loopt een vloedgolf met een snelheid van 100 km/u met de wijzers van de klok mee rond Schotland de Noordzee af, van Wick naar N.Berwick naar Hull.

De twee getijden ontmoeten elkaar in de monding van de Theems. Het toeval wil dat de Schotse golf 12 uur later aankomt dan de overeenkomstige golf uit Dover. Daarom komt hij bijna synchroon samen met de volgende getijdengolf uit Dover en ontvangt Londen dagelijks de normale twee getijden.

De kracht die wij uit de getijden kunnen halen, kan nooit groter zijn dan de totale kracht van deze getijdengolven uit de Atlantische Oceaan. Het totale vermogen dat de twee in **Fig.14.6** getrokken lijnen kruist, is gemeten; gemiddeld is dit 100 kWh/d per persoon. Als we ons voorstellen dat we 10% van deze inkomende energie aftappen, en dat doen met een 50% efficiënt proces (voor omzetting en transmissie), dan zou dit een gemiddeld vermogen van **5 kWh per dag per persoon** opleveren.



Fig.14.6: Het gemiddelde inkomende vermogen van de maangolven loodrecht op deze twee lijnen werd gemeten: 250 GW. Verdeeld over 60 miljoen mensen is dit 100 kWh per dag per persoon.

Dit is een eerste schatting op basis van buikgevoel, zonder specifieke technische details te hebben uitgewerkt. Laten we nu de potentiële output van drie specifieke oplossingen onderzoeken: Getijdenkwekerijen, stuwdammen, en offshore getijdenlagunes.

Tabel.14.7: Vermogensdichtheid van getijdenparken (in watt per vierkante meter zeebodem) als functie van de stroomsnelheid (1 knoop = 1 zeemijl per uur = 0,514 m/s).

Snelheid		Vermogensdichtheid
(m/s)	(knoep)	(W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Getijdeboerderijen

Eén manier om energie uit de getijdenstroom te halen is de bouw van een getijdenpark, vergelijkbaar met een windmolenpark. [096] De eerste onderwater 'windmolen' die online kwam was een "300kW" turbine, geïnstalleerd in 2003 bij de noordelijke stad Hammerfest in Noorwegen. Hierover zijn nog geen gedetailleerde resultaten gepubliceerd en er is nog geen getijdenpark met meer dan één turbine geïnstalleerd, zodat we op de natuurkunde en de kunst van het schatten moeten vertrouwen om te voorspellen hoeveel stroom dergelijke getijdenparken zouden kunnen opwekken. Ervan uitgaande dat de regels voor de bouw van een getijdenpark verge-

lijkbaar zijn met die voor een windmolenpark, en dat de turbines qua rendement vergelijkbaar zijn met de beste windmolens, geeft **Tabel.14.7** de output van een getijdenpark bij bepaalde getijdenstroomgrootten.



Fig.14.8: De voorgestelde stuw in de Severn (linksonder) en Strangford Lough in Noord-Ierland (linksboven) vergeleken op schaal met de stuw in La Rance (rechtsonder). De kaart toont twee mogelijke locaties voor de stuwdam in de Severn. De variant in Weston-super-Mare zou gemiddeld 2 GW (0,8 kWh/d/p) leveren, de buitenvariant tweemaal zoveel. Een grote getijdenenergiebron bevindt zich in Noord-Ierland: Strangford Lough heeft een oppervlakte van 150 km², het getijdenverschil bedraagt er ongeveer 4,5 m (springtij) of 1,5 m (doodtij) - helaas niet zo hoog als bij La Rance of op de Severn. Het getijdenvermogen is ruwweg 150 MW, verdeeld over de 1,7 miljoen mensen in Noord-Ierland is dat 2 kWh/d/p. De eerste getijdenstroomgenerator van Engeland werd in Strangford Lough in bedrijf genomen.

Bij de gebruikelijke getijdenstromingen van 2-3 knopen zijn er veel plaatsen in Engeland waar getijdenboerderijen 6 W/m² en meer kunnen produceren. Vergelijk dat eens met windmolenparken (2-3 W/m²) en PV in de open lucht (5-10 W/m²).

Getijdenenergie is niet te versmaden! Wat zou het bijdragen als we alle economische belemmeringen voor de exploitatie ervan zouden wegnemen, als we alle veelbelovende terreinen in Engeland zouden uitrusten? In bijlage G is een lijst van de bieten samengesteld en wordt de bijdrage geraamd op **9 kWh/d per persoon**.

[097] Stuwdammen

Getijden stuwdammen zijn een beproefde technologie. De beroemde stuwdam van La Rance in Frankrijk, – zie https://nl.wikipedia.org/wiki/Waterkrachtcentrale_Rance – waar het gemiddelde getijdenverschil 8 m bedraagt, heeft sinds 1966 een gemiddeld vermogen van 60 MW geproduceerd. Het getijdenverschil is ook ongewoon hoog in het estuarium van de Severn. Bij Cardiff is de lift 11,3 m bij springtij, 5,8 m bij doodtij. Indien een stuwdam over het estuarium (van Weston-super-Mare tot Cardiff) zou worden geplaatst, zou dit een getijdenbekken van 500 km² opleveren (fig.14.8).

Merk op hoe veel groter dit bekken is dan La Rance. Wat voor kracht zou hier gewonnen kunnen worden als het water op de juiste tijden in en uit zou kunnen stromen en bij eb en vloed generatoren zou kunnen voeden? Volgens de theoretische waarden in **Tabel.14.4.** zou een maximum van 14,5 GW of 5,8 kWh/d per persoon mogelijk zijn met een lift van 11,3 m (bij 30 W/m²), en zou nog 3,9 GW of 1,6 kWh/d/p mogelijk zijn met een lift van 5,8 m (8 W/m²). Deze cijfers zijn gebaseerd op de veronderstelling dat het water bij vloed in één golf wordt ingelaten en bij eb weer in één golf wordt afgevoerd. In de praktijk duurt het vullen en legen enkele uren, waardoor het vermogen enigszins daalt. De huidige plannen voor de opstuw-
 wing voorzien in stroomopwekking in slechts één richting, waardoor de opbrengst met 50% wordt verminderd. In de rapporten van ingenieurs over de voorgestelde stuw-
 dam in de Severn wordt een opbrengst van 0,8 kWh/d per persoon genoemd die alleen afkomstig is van de ebstroomrichting. De stuw zou ook bescherming bieden tegen overstromingen, ter waarde van 120 miljoen euro per jaar.

Getijdenlagunes

Getijdenlagunes worden gecreëerd door wanden in zee; zij worden dan gebruikt als kunstmatige getijdenpoelen. Goede randvoorwaarden voor getijdenlagunes zijn: Het water is ondiep en het getijdenverschil is groot. Schaalvoordelen zijn van toepassing: grote getijdenlagunes kunnen goedkopere elektriciteit produceren dan kleine. Twee belangrijke kandidaten voor getijdenlagunes in Engeland zijn The Wash aan de oostkust en de wateren voor Blackpool aan de westkust (Fig.14.9).

Kleinere locaties zouden kunnen worden gesitueerd in Noord-Wales, Lincolnshire, Zuidwest-Wales en East Sussex.



Fig.14.9: Twee getijdenlagunes met een oppervlakte van 400 km², één voor de kust van Blackpool, de andere in The Wash. Ter vergelijking is ook het estuarium van de Severn aangegeven.

Indien twee lagunes op dezelfde plaats worden gebouwd, is er een handige truc die kan worden toegepast om het vermogen te verhogen, zodat op elk moment "op bestelling" vermogen kan worden geleverd, ongeacht het waterpeil.

De ene lagune kan worden gebruikt als een "lagune bij vloed", de andere als een "lagune bij eb". [098] Bij eb kan een deel van de bij het uitstromen uit de vloedlagune onttrokken energie worden gebruikt om de eblagune verder leeg te pompen, waardoor het peil ervan tot onder het ebpeil daalt. De energie die hiervoor wordt gebruikt, wordt later met rente teruggevoerd wanneer stroom wordt opgewekt door het vullen van de eb-lagune. Evenzo kan bij vloed extra water in de overstromingslagune worden gepompt. In welke getijdenfase je je ook bevindt, een van de twee lagunes kan altijd stroom afgeven. Bovendien kan een dergelijk tweetal getijdenlagunes dienen als pompaccumulatievoorziening die overtollige energie van het elektriciteitsnet kan opslaan.

Het gemiddelde vermogen per oppervlakte-eenheid dat door getijdenlagunes in de wateren van het VK kan worden bereikt, bedraagt $4,5 \text{ W/m}^2$, zodat getijdenlagunes $1,5 \text{ kWh/d}$ stroom per persoon zouden kunnen opwekken over een gebied van 800 km^2 (zoals uitgezet in fig.14.9),

Voordelen van getijden

Alles bij elkaar kunnen stuwdammen, getijdenlagunes en getijdenboerderijen samen ongeveer 11 kWh/d per persoon leveren (fig.14.10).

Getijdenenergie is in Engeland nog nooit op industriële schaal gebruikt, dus het is moeilijk in te schatten wat de economische en technische uitdagingen zullen zijn als we getijdenturbines bouwen en exploiteren - corrosie, ophoping van sediment, verstopping door drijfhout? Maar er zijn zeven redenen voor hydro-elektrische energie in Engeland:

1. getijdenenergie is volledig voorspelbaar; in tegenstelling tot zonne- en windenergie is getijdenenergie een hernieuwbare energiebron waarop kan worden vertrouwd; getijdenenergiecentrales werken het hele jaar door dag en nacht; energie kan worden opgeslagen in getijdenlagunes en worden teruggevoerd wanneer dat nodig is.
2. De opeenvolgende hoog- en laagwatergetijden doen er ongeveer 12 uur over om de Britse eilanden rond te gaan. De sterkste stromingen in Anglesay, Islay, Orkney en Dover komen op verschillende tijdstippen voor; een groot

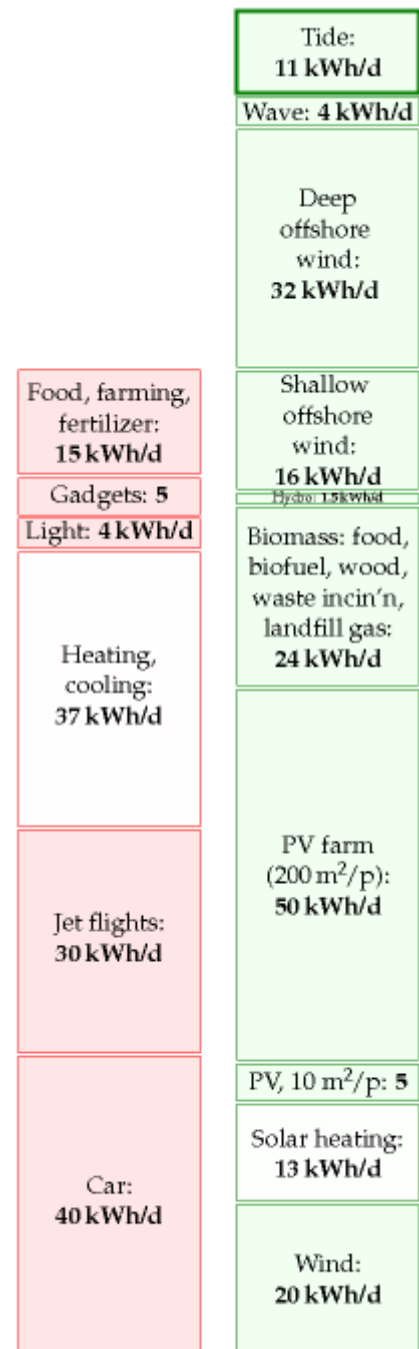


Fig.14.10: Getijden

aantal getijdenparken zou dus een betrekkelijk constante stroomopbrengst voor het net kunnen vertegenwoordigen (in vergelijking met een grote getijdencentrale), hoewel deze totale stroomopbrengst ook varieert met de maanstand.

3. Getijdenenergie is al miljoenen jaren beschikbaar.
4. er is geen kostbare apparatuur voor nodig, zoals fotonvoltaïsche panelen.
5. omdat de vermogensdichtheid van de typische getijdenstroom groter is dan de vermogensdichtheid van wind, is een typische getijdenturbine van 1MW kleiner dan een typische windturbine van 1MW; getijdenturbines kunnen dus goedkoper worden dan windturbines.
6. Het leven onder de golven is vredig; er zijn geen verwoestende getijdenstormen onder water; in tegenstelling tot windturbines, die een zekere mate van engineering vereisen om orkanen te weerstaan die zelden voorkomen, vereisen onderwaterturbines geen grote veiligheidsfactor in hun ontwerp.
7. De mensen leven hoofdzakelijk op het land en kunnen niet onder de zee kijken, zodat bezwaren tegen de visuele en esthetische gevolgen van getijdenturbines waarschijnlijk minder fel zouden moeten zijn dan voor windturbines.

[099] Verhalen en mythen

Getijdenenergie, zeker schoon en groen, mag niet hernieuwbaar worden genoemd. Energie onttrekken aan getijden vertraagt de rotatie van de aarde. Dus je kunt de getijden zeker niet gebruiken op de lange termijn.

Fout. Natuurlijke getijden vertragen de draaiing van de aarde al. Het natuurlijke energieverlies bedraagt ongeveer 3 TW (Shepherd, 2003) Q19¹⁹ Door de getijdenwrijving wordt de dag elke eeuw 2,3 milliseconden Q20²⁰ langer. Veel getijdenenergiesystemen onttrekken stromingsenergie die hoe dan ook verloren zou gaan aan wrijving. Maar zelfs als we de energie die door de getijden aan het Aarde-Maan-systeem wordt onttrokken, zouden verdubbelen, zou de energie nog minstens een miljard jaar meegaan.

19) Q19 Dat is 3000 GW, of 72.000 GWh/d, of 12 kWh/d/p wereldwijd.

20) Q20 Dat is $2,6 \cdot 10^{-6}$ % energieverlies per eeuw, wat overeenkomt met een halveringstijd van meer dan een miljard jaar.

100] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[094]	het maximaal haalbare vermogen van een kunstmatige pool 82 Het vermogen van een kunstmatig getijdenbad. Het vermogen per oppervlakte-eenheid van een getijdenbekken wordt afgeleid in hoofdstuk G, blz. 311.
[094]	Engeland is al uitgerust met zo'n natuurlijk getijdenbekken: de Noordzee - Groot-Brittannië beschikt al over een natuurlijke getijdenpoel . . . bekend als de <u>Noordzee</u> . Ik moet niet de indruk wekken dat de Noordzee zich vult en leegt zoals een getijdenbekken aan de Engelse kust. De stromingen in de Noordzee zijn complexer omdat de tijd die nodig is om een hobbel in het waterpeil over de zee te verspreiden, vergelijkbaar is met de tijd tussen de getijden. Niettemin zijn er geweldige getijdenstromingen in en uit de Noordzee, en ook binnen de Noordzee.
[095]	Het totale vermogen werd gemeten; gemiddeld is dit 100 kWh/d per persoon 83 <u>Het totale inkomende vermogen van de getijdengolven van de maan die deze lijnen kruisen is gemeten op 100 kWh per dag per persoon.</u> Bron: Cartwright et al. (1980). Voor lezers die van achter-de-schermen-modellen houden, laat hoofdstuk G zien hoe dit vermogen uit eerste beginselen kan worden geschat.
[097]	De beroemde stuwdam van La Rance in Frankrijk 84 La Rance heeft in 30 jaar 16 TWh opgewekt. Dat is een gemiddeld vermogen van 60 MW. (Het piekvermogen is 240 MW.) Het getijdenverschil bedraagt tot 13,5 m; het opgestuwde gebied is 22 km ² ; de stuw is 750 m lang. Gemiddelde vermogensdichtheid: 2,7 W/m ² . Bron: [6xrm5q].
[097]	De rapporten van de ingenieurs over de voorgestelde stuwdam bij de Severn. 85 De rapporten van de ingenieurs over de stuwdam bij de Severn...zeggen 17 TWh/jaar. (Taylor, 2002b). Dit (2 GW) komt overeen met gemiddeld 5% van het huidige totale elektriciteitsverbruik in het VK.
[098]	Het gemiddelde vermogen van getijdenlagunes in de wateren van het VK bedraagt 4,5 W/m². – 86 <u>Het vermogen per oppervlakte-eenheid van getijdenlagunes zou 4,5 W/m² kunnen bedragen.</u> MacKay (2007a).

15 dingen

Dingen voor dagelijks gebruikelijk

Een enorm energieverbruik in de "ontwikkelde" wereld is de productie van "dingen". In hun natuurlijke levenscyclus, doorlopen ze drie stadia: Eerst wordt het pas-geboren ding in een glanzende verpakking op de plank van een winkel aangeboden. In dit stadium wordt het ding "koopwaar" genoemd. Zodra het ding is gekocht en uitgepakt, verandert het in zijn tweede vorm: "spullen". Dit spul leeft nu bij zijn eigenaar voor een paar maanden of jaren. Ondertussen worden de spullen grotendeels genegeerd door de eigenaar, die in de winkels is om nieuwe spullen te kopen. Soms, door een wonder van moderne alchemie, wordt het spul dan getransformeerd in zijn uiteindelijke vorm: "vuilnis". Voor het ongeoefende oog is het vaak moeilijk om "afval" van "goederen" te onderscheiden. Maar zodra de eigenaar dit inzicht heeft verkregen, betaalt hij de vuilnisman om zich van dit ding te ontdoen.



Afb.15.1: Vuilnisreclame van Selfridge

Laten we zeggen dat we de volledige energiekosten van deze alledaagse dingen willen begrijpen, misschien om nog betere dingen te ontwerpen. Dit wordt levenscyclusanalyse genoemd. Het is gebruikelijk om de energiekosten van een ding - van een haardroger tot een cruiseschip - in vier fasen op te splitsen:

Fase R: Verwerking tot ruwe grondstoffen. Dit omvat ontginnen van de mineralen, smelten en zuiveren ervan, en ze omzetten in de bouwstenen die de fabrikant nodig heeft: Plastic, glas, metaal, keramiek, enz. De energiekosten van deze fase omvatten ook de levering van de grondstoffen aan hun volgende verwerkingspunt.

Fase P: Productie: hier worden de grondstoffen omgezet in een (eind)product. In de fabrieken waar de spoelen van de haardroger worden gewikkeld, de fraaie behuizing wordt gegoten of de onderdelen zorgvuldig in elkaar worden geklikt, wordt gebruik gemaakt van warmte en licht. Deze fase omvat ook de verpakking en het verdere vervoer.

Fase U: (Use) Gebruik: haardrogers en cruiseschepen verbruiken energie wanneer ze worden gebruikt zoals bedoeld.

Fase D: (Disposal) Verwijdering: Dit omvat de energie die nodig is om het naar stortplaatsen te brengen of het terug in grondstoffen te veranderen (recycling). En het opruimen van alle vervuiling die is ontstaan in verband met deze dingen.

Om te begrijpen hoeveel energie de levenscyclus van een "ding" vergt, moeten we de kosten van al deze vier fasen afzonderlijk ramen, en ze dan optellen. Gewoonlijk domineert één fase de energiekosten. Voor een redelijke schatting moet dus vooral de dominante fase vrij nauwkeurig worden geschat. Als we dingen energie-efficiënter willen ontwerpen, moeten we ons meestal concentreren op de dominante fase. Het is belangrijk op te merken dat de besparingen in de dominante fase niet teniet worden gedaan door extra inspanningen in de andere drie fasen.

[102] In plaats van een gedetailleerde schatting te maken van de energiebehoeften die de voortdurende totale productie van alle dingen voor dagelijks gebruik met zich meebrengt, zullen wij eerst een paar algemeen bekende voorbeelden behandelen: Drankverpakkingen, computers, batterijen, reclame, auto's en huizen. Dit hoofdstuk is toegespitst op de fasen R en P. Deze energiekosten worden vaak de belichaamde energie van een voorwerp genoemd.

Tabel.15.2: *Grijze energie in materialen, in kWh per kg.*

Grijze energie (ingesloten energie) (kWh per kg)	
fossiele brandstoffen	10
hout	5
papier	10
glas	7
PET Plastic	30
aluminium	40
staal	6

Drankcontainers

Laten we uitgaan van het volgende consumentengedrag bij Cola: Je drinkt vijf blikjes per dag van een chemische multinational en gooit het aluminium blikje weg. Hierbij domineert de grondstoffase de energiekosten. De metaalproductie is energie-intensief, vooral de productie van aluminium. Eén aluminium blikje verbruikt 0,6 kWh bij de productie. Een consumptiegedrag van 5 blikjes per dag vergt energie ten belope van **3 kWh/d.**

Een PET-waterfles van 0,5 l (25 g gewicht) heeft 0,7 kWh grijze energie - niet beter

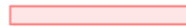
dan aluminium.

Andere verpakkingen

De gemiddelde Brit gooit 400 gram verpakkingsmateriaal per dag weg - vooral voedselverpakkingen. De grijze energie van verpakkingen varieert van 7 tot 20 kWh per kg als we het spectrum doorlopen van glas en papier tot plastic en metalen blikjes. Als we uitgaan van een gemiddelde van 10 kWh/kg, bedraagt de energievoetafdruk van verpakkingen **4 kWh/d**. Een klein deel van deze energie is recycleerbaar via afvalverbranding, zoals we zullen bespreken in [hoofdstuk 27](#).

Fig.15.3: (rechts) Vijf aluminium blikjes per dag is 3 kWh/d. De grijze energie in andere verpakkingen die door de gemiddelde Engelsman wordt weggegooid, bedraagt 4 kWh/d.

Aluminium: 3 kWh/d



Packaging:
4 kWh/d



Chips: 2.5 kWh/d



Fig.15.4: (links) Het maken van computerchips. Foto: ABB. Elke 2 jaar een PC maken kost 2,5 kWh per dag.

[103] Computers

Het kost 1800 kWh om een PC te maken. Als u om de 2 jaar een nieuwe computer koopt, geeft dit een energieverbruik van **2,5 kWh/d**.

Batterijen De energiekosten voor de productie van een AA-nikkel-cadmiumbatterij, die 0,001 kWh kan opslaan en 25 g weegt, bedragen 1,4 kWh (fasen R en P). Als de energiekosten van wegwerpbatterijen vergelijkbaar zijn, kosten twee AA-batterijen per maand **0,1 kWh/d**. De energiekosten zijn daarom waarschijnlijk een te verwaarlozen post op uw energiebalans.

Kranten, tijdschriften en reclamepost

Een weekblad van 36 bladzijden, dat gratis wordt verspreid in metrostations, weegt 90 gram, een dagblad (56 bladzijden) 150 gram. "The Independent" (56 pagina's) 200 g. Een geïllustreerd reclamemagazine van 56 bladzijden en het *Cambridgeshire Pride Magazine* (32 bladzijden), beide gratis aan huis verspreid, wegen respectievelijk 100 g en 125 g.



Newspapers,
junk mail,
magazines:
2 kWh/d



Deze stroom van lectuur en reclameboodschappen die door onze brievenbussen stroomt, bevat energie. Het kost ook energie om te produceren en te leveren. Papier heeft een grijze energie-inhoud van 10 kWh/kg. Dus uitgaande van 200 g per dag per persoon (gelijk aan één "Independent" per dag), is de totale grijze energie van de vloed aan reclame, tijdschriften en kranten ongeveer **2 kWh per dag**.

Papierrecycling bespaart ongeveer de helft van die energie. Afvalverbranding bespaart ook een deel van die energie, of als ik het papier thuis in mijn open haard verbrand.

Grotere dingen

Voor velen is een huis het belangrijkste wat ze ooit zullen kopen.

In hoofdstuk H maak ik een schatting van de energiekosten van een nieuw huis. In de veronderstelling dat we elk huis na 100 jaar vervangen, zou dat een energiebijdrage zijn van **2,3 kWh/d**. Hierbij wordt alleen rekening gehouden met het omhulsel van het gebouw - funderingsmassa, bakstenen, dakpannen, dakpannen. Als een huis wordt bewoond door gemiddeld 2,3 personen, bedraagt het gemiddelde energieverbruik van één persoon door het gebouw **1 kWh/d per persoon**.

House-building: 1 kWh/d



[104]Hoe zit het met een auto, een weg? Sommigen van ons hebben de eerste, maar we gebruiken allemaal de tweede. De grijze energie van een nieuwe auto bedraagt 76000 kWh, als deze om de 15 jaar wordt vervangen, is dat gemiddeld **14 kWh per dag**.

Car-making:
14 kWh/d

Road-building: 2 kWh/d



In een levenscyclusanalyse van Treloar, *Love and Crawford* wordt de aanleg van een Australische weg geraamd op 7600 kWh per meter (een composietweg van gewapend beton) en de totale kosten inclusief onderhoud over 40 jaar op 35.000 kWh per meter. Laten we dit gebruiken om de orde van grootte te schatten voor de wegen in het VK. Er is 28.000 mijl ^{Q2121} aan hoofdwegen en plattelandswegen (exclusief autosnelwegen). Met 35.000 kWh per meter over 40 jaar kost dit wegennet ons **2 kWh/d per persoon**.

Het vervoer van "dingen"

21) ^{Q21} is gelijk aan 45.000 km (1 mijl = 1,6 km).

Tot nu toe heb ik geprobeerd het persoonsgebonden verbruik te schatten. "Als je 5 blikjes cola weggooit, is dat 3 kWh, als je de *Independent* koopt, is dat 2 kWh". Hier wordt het echter wat minder persoonlijk. Voor het vervoer van goederen door het land en over de wereld, gebruik ik nationale totalen en deel die door het aantal inwoners.

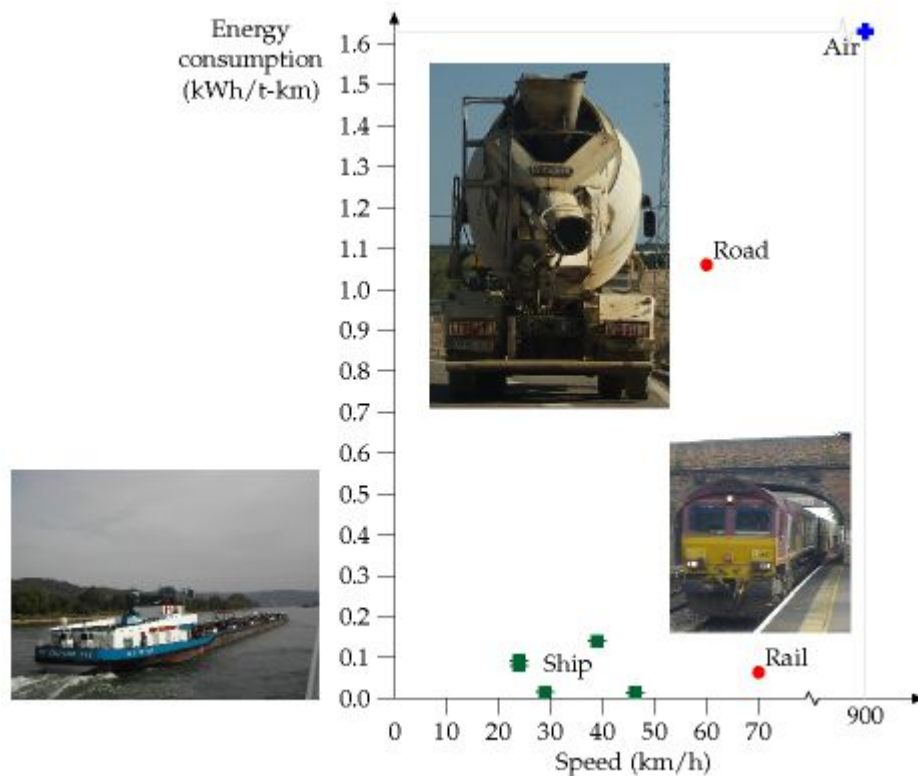


Fig.15.8: *Energie voor verschillende vormen van vrachtvervoer. De verticale coördinaat geeft de gebruikte energie per netto ton-km in kWh (dit is de energie per t-km vracht exclusief het voertuiggewicht). Zie ook Fig.20.23 (Energie voor personenvervoer)*

Het goederenvervoer wordt gemeten in tonkilometers (t-km). Als een ton Cornish pasteitjes 580 km wordt vervoerd, is dat 580 t-km. De energie-intensiteit van het wegvervoer in Engeland is **1 kWh per t-km**.



Fig.15.5: Voedselkilometers: pasteitjes, handgemaakt in Cornwall, 580 km vervoerd voor consumptie in Cambridge.

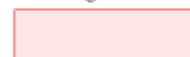
Als een containerschip zoals in **fig.15. 6** 50.000 ton lading over 10.000 km vervoert, is dat 500 miljoen t-km vrachtvervoer. De energie-intensiteit van dit containerschip is **0,015 kWh per t-km**. Opmerkelijk hoeveel goedkoper verscheper is vergeleken met vrachtvervoer over de weg. Deze en andere energie-intensiteiten worden getoond in **Fig.15.8**.

Wegvervoer

In 2006 bedroeg het totale wegvervoer door vrachtwagens in Engeland 156 miljard t-km. Verdeeld over 60 miljoen Britten komt dit neer op 7 t-km per dag per persoon, wat 7 kWh per dag per persoon kost (bij 1 kWh per t-km). Een kwart van dit vervoer omvatte overigens voedsel, drank en tabak.

Fig.15.7a: De vrachtwagen gaf en de vrachtwagen nam. Energiekosten van Engelse vrachtwagens: 7 kWh/d per persoon.

Road freight: 7 kWh/d



[105] Vervoer over water

In 2002 behandelden de Britse havens 560 miljoen ton goederen. Tyndall-Centre berekende dat het aandeel van het VK in de internationale scheepvaart **4 kWh/d per persoon** bedroeg.

Fig.15.7b: Vervoer over het water verbruikt energie omdat de boot golven creëert. Desondanks is de verzending verrassend energie-efficiënt.

Shipping: 4 kWh/d





Fig.15.6: (Rechts) Het containerschip *Ever Liberty* bij de Thamesport Container Terminal. Foto door Ian Boyle

Vervoer van water en afvalwater

Water is geen bijzondere stof, maar wij gebruiken er veel van - ongeveer 160 liter per dag per persoon. Bijgevolg produceren wij ook iets van 160 liter afvalwater per dag per Vervoer over water verbruikt energie omdat de boot golven veroorzaakt. Toch is het vervoer van vracht verrassend energie-efficiënt.

[106] persoon, die wij doorgeven aan afvalverwerkingsbedrijven. De kosten van watervoorziening en afvalwaterverwijdering bedragen ongeveer 0,4 kWh/d per persoon.

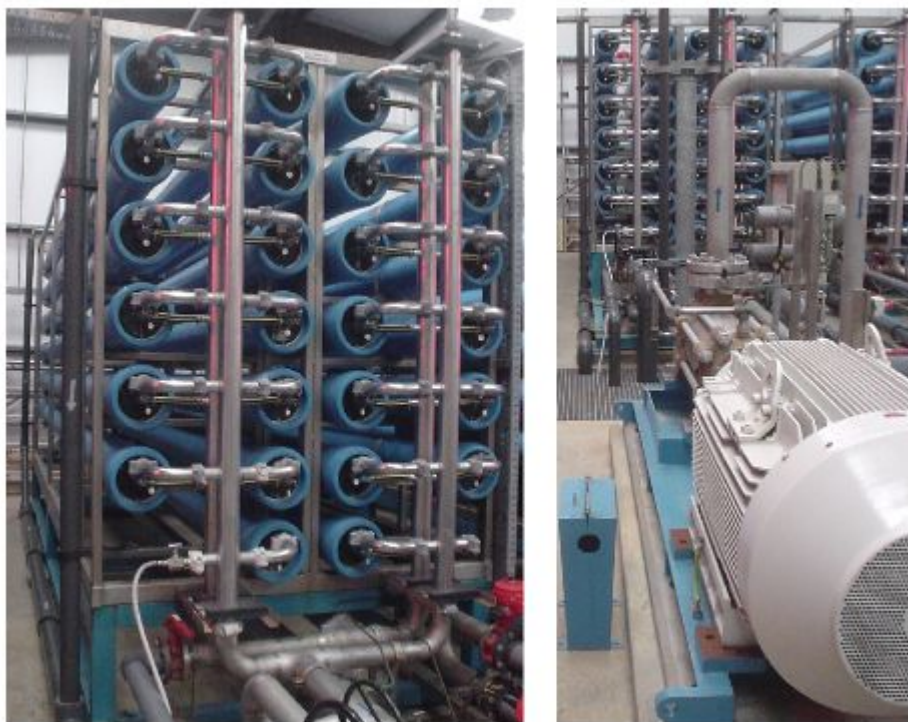
Fig.15.9: *Watervoorziening 0,3 kWh/d, afvalwaterafvoer 0,1 kWh/d*

Water delivery
and removal:
0.4 kWh/d

Zeewaterontzilting

Momenteel gebruikt Engeland geen energie voor zeewaterontzilting. Er wordt echter gesproken over de bouw van een ontziltingsinstallatie in Londen. Wat zijn de energiekosten om zout water om te zetten in drinkwater? De meest energie-efficiënte methode is omgekeerde osmose. Neem een membraan dat alleen water doorlaat, doe er zout water aan een kant van en zet het onder druk. Het water sijpelt langzaam door het membraan, en wordt zuiverder water - langzaam, omdat zuiver water gescheiden van zout een lagere entropie heeft, en de natuur geeft de voorkeur aan een toestand met een hogere entropie waarin alles door elkaar loopt.

We moeten hoge energie toevoegen om scheiding te bereiken. Het eiland Jersey beschikt over een ontziltingsinstallatie die dagelijks 6000 m³ zuiver water kan leveren (fig.15.10). Inclusief de pompen die het water uit zee aanvoeren en door een reeks filters voeren, vereist de installatie 2 MW aan vermogen. Dit is 8 kWh per kubieke meter geproduceerd water. Bij een verbruik van 8 kWh per kubieke meter is voor het dagelijkse verbruik van 160 liter 1,3 kWh/d aan stroom nodig.



Afb.15.10: Onderdelen van de osmose-installatie in de zeewaterontziltingsinstallatie op Jersey. De pomp rechts op de voorgrond heeft een vermogen van 355 kW en schept zeewater onder een druk van 65 bar in 39 spiraalmembranen. Dit zijn de horizontale blauwe buizen die in banken zijn geplaatst (links). Het levert 1500 m³ drinkwater per dag. Het drinkwater van deze installatie veroorzaakt energiekosten van 8 kWh per m³.

Detailhandel

De supermarkten van Engeland verbruiken 11 TWh per jaar. Gelijkmatic verdeeld over 60 miljoen gelukkige klanten komt dit neer op 0,5 kWh per dag per persoon.

Supermarkets:
0.5 kWh/d

[107] Het belang van ingevoerde goederen

In de standaardtellingen van "het energieverbruik in het VK" of "de koolstofvoetafdruk van het VK" zijn de ingevoerde goederen niet inbegrepen. Engeland was gewend zijn eigen boontjes te doppen, en onze voetafdruk per hoofd van de bevolking was in 1910 even groot als die van Amerika vandaag.

Tegenwoordig produceert Engeland niet zo veel meer (ons energieverbruik en onze CO²-uitstoot zijn ook wat gedaald), maar we houden nog steeds van "dingen", en die krijgen we nu geleverd uit andere landen. ^{Q2222}.

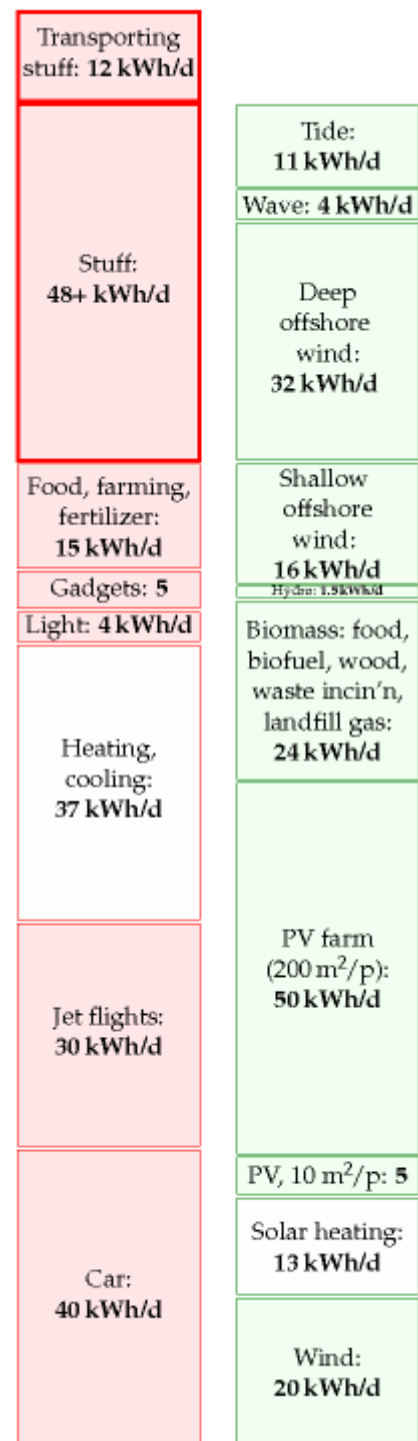
22) Q22 Als de grijze energie van ingevoerde goederen in de nationale cijfers wordt meegerekend, zou in principe ook de grijze energie van uitgevoerde goederen niet in de nationale cijfers mogen worden meegerekend. Dit leidt tot grote problemen bij de berekening van de nationale statistieken (vooral als de energiemix van het producerende land en die van het verbruikende land aanzienlijke verschillen vertonen, zie aanhangsel H). De grijze energie in de Britse export bedraagt ongeveer 50% van de ingevoerde grijze energie, aldus de auteur.

Moeten we nu de energiekosten van de fabricage van een ding negeren omdat het geïmporteerd is? Ik denk het niet. Dieter Helm en zijn collega's in Oxford schatten dat de koolstofvoetafdruk van Engeland bijna het dubbele is van de officiële "11 ton CO₂e per persoon", namelijk 21 ton. Dit impliceert dat de grootste bijdrage in de energievoetafdruk van een gemiddelde Engelsman wordt gevormd door de energiekosten van ingevoerde goederen.

In [bijlage H](#) verken ik dit idee verder, in termen van het gewicht van de Britse invoer. De invoer van brandstoffen buiten beschouwing gelaten, bedraagt deze iets meer dan 2 ton per persoon per jaar, waarvan 1,3 ton voor rekening komt van be- en verwerkte goederen zoals voertuigen, machines, witgoed, elektrische en elektronische apparatuur. Dit komt neer op ongeveer 4 kg per dag per persoon. Dergelijke goederen worden grotendeels gemaakt van materialen waarvan de productie ten minste 10 kWh per kg vergt.

Daarom schrijf ik een Grijs Energie van minstens 40 kWh/d per persoon toe aan deze stapel auto's, koelkasten, magnetrons, computers, fotokopieerapparaten en televisies. ^{Q2323} Om al deze vormen van dingen voor dagelijks gebruik en hun transport samen te vatten, zet ik op de verbruikspool **48 kWh/p** per persoon (40 voor invoer, 2 voor kranten, 2 voor wegenbouw, 1 voor huizenbouw, 3 voor verpakking) voor de goederen zelf en nog eens **12 kWh/d per persoon** voor het vervoer over zee, over de weg en via pijpleidingen, en voor opslag in supermarkten.

Fig.15.11: De productie van onze consumptiegoederen verbruikt minstens 48 kWh/d, en de levering nog eens 12 kWh/d.



23) **Q23** Dit cijfer is een zeer ruwe schatting omdat er geen onderscheid wordt gemaakt tussen commerciële invoer en binnenlands verbruik. Van de totale invoer zouden industriële goederen (fabricagemachines, vrachtwagens) of de invoer van de bouwnijverheid, die hierboven reeds in de woningbouw was opgenomen, ten minste eerst moeten worden uitgesloten. Zo ook geïmporteerde kunstmest, geïmporteerde levensmiddelen, geïmporteerde computers, aluminium blikjes, auto's, tijdschriften, enz. die hierboven reeds in een eerdere schatting per soort zijn opgenomen.

[108] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[102]	Een aluminium blikje verbruikt 0,6 kWh bij de productie 89 Eén aluminium drankblikje kost 0,6 kWh. De massa van één blikje is 15 g. Schattingen van de totale energiekosten van de productie van aluminium lopen uiteen van 60 MJ/kg tot 300 MJ/kg. [yx7zm4], [r22oz], [yhrest]. Het cijfer dat ik heb gebruikt is van The Aluminum Association [y5as53]: 150 MJ per kg aluminium (40 kWh/kg).
[102]	Een 0,5l PET-waterfles – De belichaamde energie van een waterfles gemaakt van PET. Bron: Hammond and Jones (2006) - De belichaamde energie van PET is 30 kWh per kg.
[102]	De gemiddelde Brit gooit 400 gram verpakkingsmateriaal per dag weg -. De gemiddelde Brit gooit 400 g verpakkingen per dag weg. In 1995 gebruikte Groot-Brittannië 137 kg verpakking per persoon (Hird et al., 1999).
[103]	De productie van een PC kost 1800 kWh – Een personal computer kost 1800 kWh aan energie. De fabricage van een PC vergt (in energie en grondstoffen) het equivalent van ongeveer 11 maal zijn eigen gewicht aan fossiele brandstoffen. Koelkasten vergen 1-2 maal hun eigen gewicht. Auto's vergen 1 à 2 maal hun eigen gewicht. Williams (2004); Kuehr (2003).
[103]	Productie van een AA nikkel-cadmium oplaadbare batterij -. een oplaadbare nikkel-cadmium batterij. Bron: Rydh en Karlström(2002). ...staal... Uit Zweeds staal: "Het verbruik van kolen en cokes bedraagt 700 kg per ton afgewerkt staal, wat overeenkomt met ongeveer 5320 kWh per ton afgewerkt staal. Het verbruik van olie, LPG en elektrische energie bedraagt 710 kWh per ton eindproduct. Het totale [primaire] energieverbruik bedraagt dus ongeveer 6000 kWh per ton afgewerkt staal." (6 kWh per kg.) [y2ktgg] 103 Die Graue Energie eines Neuwagens ist 76 000 kWh 90 De belichaamde energie van een nieuwe auto bedraagt 76 000 kWh. Bron: Treloar et al. (2004). Burnham et al. (2007) geven een lager cijfer: 30 500 kWh voor de netto-levenscycluskosten van een auto. Een van de redenen voor het verschil kan zijn dat er bij laatstgenoemde levenscyclusanalyse van wordt uitgegaan dat het voertuig wordt gerecycleerd, waardoor de nettomateriaalkosten lager uitvallen.
[103]	Papier heeft een grijze energie-inhoud van 10 kWh/kg 90 Papier heeft een ingebedde energie van 10 kWh per kg. Het maken van krantenpapier uit onbewerkt hout heeft een energiekost van ongeveer 5 kWh/kg, en het papier zelf heeft een energie-inhoud die vergelijkbaar is met die van hout, ongeveer 5 kWh/kg. (Bronnen: Ucuncu (1993); Erdinler en Vesilind (1993); zie blz. 284.) De energiekosten verschillen per fabriek en per land. 5 kWh/kg is het cijfer voor een Zweedse krantenmolen in 1973 van Norrström (1980), die schatte dat efficiëntiemaatregelen de kosten tot ongeveer 3,2 kWh/kg zouden kunnen terugbrengen. In een recentere analyse van de volledige levenscyclus (Denison, 1997) worden de netto-energiekosten van de productie van krantenpapier in de VS uit onbewerkt hout, gevolgd door een typische mix van storten en verbranden, geraamd op 12 kWh/kg; de energiekosten van de productie van krantenpapier uit gerecycleerd materiaal en de recycling ervan bedragen 6 kWh/kg.
[104]	De energie-intensiteit van het wegvervoer in Engeland is 1 kWh per t-km. 91 De energie-intensiteit van het wegvervoer in het VK bedraagt ongeveer 1 kWh per t-km.

	Bron: www-dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment . [109]
[109]	104 De energie-intensiteit van dit containerschip is 0,015 kWh per t-km -. De energie-intensiteit van het vrachtvervoer door dit containerschip bedraagt 0,015 kWh per ton-km. De Ever Liberty - lengte 285 m, breedte 40 m - heeft een capaciteit van 4948 TEU, een draagvermogen van 63 000 t en een dienstsnelheid van 25 knopen; het normaal geleverde vermogen van de motor is 44 MW. Eén TEU is de grootte van een kleine 20-voet container - ongeveer 40 m³. De meeste containers die je vandaag ziet, zijn 40-voet containers met een grootte van 2 TEU. Een 40-voet container weegt 4 ton en kan 26 ton aan spullen vervoeren. Ervan uitgaande dat de motor 50% efficiënt is, komt het energieverbruik van dit schip neer op 0,015 kWh chemische energie per ton-km. www-mhi.co.jp/en/products/detail/container_ship_ever_uberty.html
[104]	het aandeel van het Verenigd Koninkrijk in de internationale scheepvaart -Britains aandeel in de internationale scheepvaart... Bron: Anderson et al. (2006).
[106]	Fig.15.8: 92 Figuur 15.8. Energieverbruik van schepen Energieverbruik van schepen Energieverbruik van schepen. De vijf punten in de figuur zijn een containerschip (46 km/u), een drogeladingschip (24 km/u), een olietanker (29 km/u), een binnenvaartschip (24 km/u), en de NS Savannah (39 km/u). Drogeladingschip 0,08 kWh/t-km. Een schip met een gra Drogeladingschip met een inhoud van 5200 m³ vervoert 3360 ton laadvermogen. Het vaart met een snelheid van 13 kn (24 km/u); zijn ene motor met 2 MW geleverd vermogen verbruikt 186 g stookolie per kWh geleverde energie (42% rendement). conoship.com/uk/vessels/detailed/page7.htm Olietanker Een moderne olietanker verbruikt 0,017 kWh/t-km Olietanker [6lbrab]. Laadgewicht 40 000 t. Inhoud: 47 000 m³. Hoofdmotor: 11,2 MW maximaal geleverd vermogen. Snelheid bij 8,2 MW: 15,5 kn (29 km/u). De energie in de olielading bedraagt 520 miljoen kWh. Dus 1% van de energie in de olie wordt gebruikt om de olie een kwart van de weg rond de aarde (10 000 km) te vervoeren. Roll-on, roll-on, roll-on, roll-off carriers off carriers off carriers De schepen van rederij Wilh. Wilhelmsen rederij leveren vrachtvervoer met energiekosten tussen 0,028 en 0,05 kWh/t-km [5ctx4k].
[111]	De kosten voor watervoorziening en rioolwaterzuivering bedragen ongeveer 0,4 kWh/d per persoon 92 Waterlevering en rioolwaterzuivering kosten 0,4 kWh/d per persoon. Het totale energieverbruik van de watersector bedroeg in 2005-6 7703 GWh. De levering van 1 m³ water kost 0,59 kWh energie. De behandeling van 1 m³ rioolwater kost 0,63 kWh. Voor wie geïnteresseerd is in de uitstoot van broeikasgassen: de watervoorziening heeft een voetafdruk van 289 g CO₂ per m³ geleverd water, en de afvalwaterzuivering van 406 g CO₂ per m³ afvalwater. Het huishoudelijk waterverbruik is 151 liter per dag per persoon. Het totale waterverbruik is 221 l/d per persoon. Lekkage bedraagt 57 liter per dag per persoon. Bronnen: Parlementair Bureau voor Wetenschap en Technologie, [www-parliament.uk/documents/upload/postpn282.pdf], Water UK (2006).
[106]	supermarkten in Engeland verbruiken 11 TWh per jaar 93 Supermarkten in het VK verbruiken 11 TWh/j. [yqbz13]
[107]	Helm en zijn collega's schatten dat de koolstofvoetafdruk van Engeland bijna twee keer zo groot is, op 21 ton - Helm et al. suggereren dat, rekening houdend met import en export, de koolstofvoetafdruk van Groot-Brittannië bijna verdubbeld is tot ongeveer 21 ton. Helm et al. (2007).

16 aardwarmte

Geothermische energie

Geothermische energie is afkomstig van twee bronnen: radioactief verval in de aardkorst en warmte uit de aardkern die door de aardmantel lekt. De hitte in de kern is daar omdat de aarde vroeger roodgloeiend was en zich nog steeds in een proces van afkoeling en verharding bevindt. De hitte in de kern van de aarde wordt ook verhoogd door getijdenwrijving: De aarde vervormt als reactie op de zwaartekracht van de maan en de zon, zoals een sinaasappel als je hem uitknijpt en tussen je handen rolt.

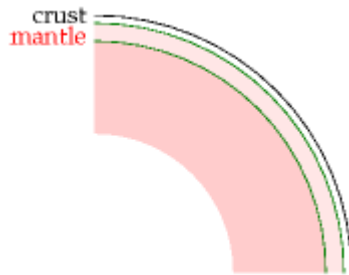


Fig.16.1: een doorsnede van de aarde



Fig.16.2: sommige granieten

Geothermische energie is een aantrekkelijke hernieuwbare energiebron omdat zij "altijd aan" is, ongeacht het weer. We kunnen geothermische centrales aan- en uitzetten als de vraag dat vereist.

Maar hoeveel geothermische energie is mogelijk? We kunnen dit schatten voor twee gevallen: het beschikbare vermogen op een gewone plaats in de aardkorst, of het beschikbare vermogen op speciale hete plaatsen, zoals IJsland (**Fig.16.3**). Hoewel de juiste plaats voor de eerste geothermische ontwikkelingen zeker zo'n bijzonder hete plek zal zijn, ga ik er toch van uit dat de grotere totale hulpbron afkomstig is van gewone plaatsen, omdat die veel meer voorkomen.

De moeilijkheid bij het opwekken van duurzame geothermische energie is de beperkte snelheid waarmee warmte door vast gesteente stroomt. Dit beperkt de snelheid waarmee duurzame warmte kan worden onttrokken aan het roodgloeiende inwendige van de aarde. Het is alsof je een ijsdrankje probeert te drinken met een

rietje: je steekt het rietje erin en zuigt, zodat je een lekkere slok verfrissende vloeistof krijgt. Maar na wat langer zuigen, zuigen je plotseling lucht. Je hebt alle vloeistof onttrokken uit het ijs rond de punt van het rietje. Je eerste snelheid van zuigen was niet duurzaam.



Fig.16.3: *Geothermische energie in IJsland. De gemiddelde geothermische energieproductie in IJsland (bevolking: 300.000) bedroeg 300 MW (24 kWh/d/p) in 2006. Meer dan de helft van de elektriciteit in IJsland wordt gebruikt voor de productie van aluminium. Foto door Gretar Ivarsson.*

Als je een rietje van 15 km in de grond steekt, zul je merken dat het daar lekker warm is, gemakkelijk warm genoeg om water te koken. Je kunt nu twee rietjes nemen, koud water door het ene pompen, en zuigen met het andere. Je zult waterdamp opzuigen, en kunt het gebruiken om een krachtcentrale te laten draaien. Onbeperkte macht? Nee. Na een tijdje zal het wegzuigen van warmte de temperatuur van het gesteente doen dalen. Je hebt geen duurzame zuiging. U zult nu lang moeten wachten tot de steen aan het uiteinde van het rietje weer warm is. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is om geothermische energie op dezelfde manier te gebruiken als fossiele voorraden: als een ontginbare hulpbron, in plaats van een duurzame bron. [111] Maar waarschijnlijk zou dat slechts een noodoplossing zijn, waardoor we nog eens honderd jaar niet duurzaam zouden leven? In dit boek ben ik, zoals de titel al aangeeft, geïnteresseerd in duurzame energiebronnen. Dus laten we nog wat verder rekeningen.

Geothermische energie op duurzame basis - om voor altijd in stand te houden.

We willen dus geothermische energie gebruiken door rietjes tot een redelijke diepte in de grond te steken en matig te zuigen. Zuigen met een snelheid dat de steen aan het eind van ons rietje niet kouder en kouder wordt. Dat wil zeggen, zuigen met een snelheid die overeenkomt met de natuurlijke warmtestroom van de aarde.

Zoals in het begin is aangetoond, is geothermische energie afkomstig van twee bronnen: radioactief verval in de aardkorst en warmte uit de aardkern die door de aardmantel lekt. In een typisch continent bedraagt de warmteflux van de mantel naar de korst ongeveer 10 mW/m^2 . De warmteflux aan het oppervlak bedraagt ongeveer 50 mW/m^2 . Radioactief verval heeft dus 40 mW/m^2 extra bijgedragen.

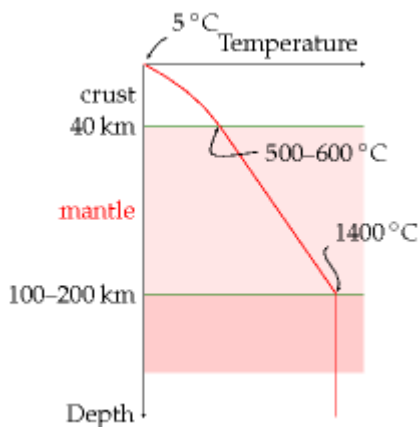


Fig.16.4: *Temperatuurprofiel in een typisch continent*

Op een typische locatie kunnen we dus maximaal 50 mW/m^2 krijgen. Maar dit vermogen is geen energie van hoog niveau, het is warmte van laag niveau die doorsijpelt bij de gegeven omgevingstemperatuur. Maar we willen waarschijnlijk elektriciteit opwekken, en daarom moeten we boren. Warmte is alleen bruikbaar als zij beschikbaar is bij een temperatuur die aanmerkelijk hoger is dan de omgevingstemperatuur. De temperatuur neemt toe met de diepte, zoals blijkt uit **Fig.16.4**, tot 500°C op 40 km. Tussen 0 km diepte, waar de warmteflux het grootst is maar de temperatuur laag, en 40 km diepte, waar het gesteente het heetst is maar de warmteflux 5 keer minder is (omdat we daar de fractie van de radioactiviteit van de korst missen), ligt een optimum waarop we zouden moeten zuigen. De exacte optimale diepte hangt af van het type afzuiging en het energiesysteem dat we gebruiken. We kunnen een limiet schatten voor het maximale vermogen dat duurzaam kan worden opgewekt. Daartoe zoeken wij de optimale diepte, ervan uitgaande dat wij a) een perfecte machine hebben om de warmte om te zetten in elektriciteit en b) gratis tot elke diepte kunnen boren.

Voor een temperatuurprofiel als in **Fig.16.4**, bereken ik 15 km als de optimale diepte. Een ideale warmtemotor zou dan 17 mW/m^2 leveren. Bij een wereldbevolkingsdichtheid van 43 mensen per km^2 komt dit neer op 10 kWh per dag per persoon, indien alle landoppervlakten zouden worden gebruikt. [112] In Engeland, waar de be-

volkingsdichtheid 5 keer zo groot is, zou dat maximaal **2 kWh/d per persoon** zijn.

Dat is een scenario dat eeuwig kan worden volgehouden, hot spots buiten beschouwing gelaten, uitgaande van perfecte energiecentrales, als elke vierkante meter van het continent wordt geëxploiteerd en de boorkosten verwaarloosbaar zijn. En dat het mogelijk is om gaten te boren van 15 km diep.

Geothermische energie als mijnbouwproduct

Een andere geothermische strategie benut warmte als hulpbron. Bij "uitgebreide geothermische winning" uit heet droog gesteente (**Fig.16.5**) boort men eerst een gat tot een diepte van 5-10 km en breekt men dat gesteente door er water in te pompen. (Deze stap kan aardbevingen teweegbrengen, die door de plaatselijke bevolking vaak niet goed worden ontvangen). Dan boren we een tweede gat in de breukzone. Vervolgens pompen we water door een van de gaten en halen we oververhit water of stoom uit het andere gat. Deze stoom kan worden gebruikt om elektriciteit op te wekken of als warmtebron.

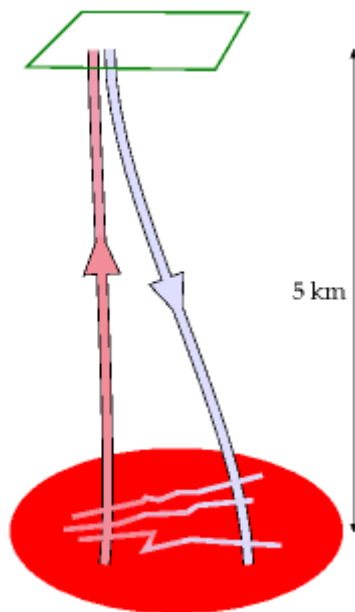


Fig.16.5: Geavanceerde geothermische winning uit heet droog gesteente. Een boorgat wordt geboord en onder druk gezet om breuken in het gesteente te maken. Een tweede put geeft toegang tot een afgelegen locatie van de breukzone. Koud water wordt in één van de putten gepompt en warm water (eigenlijk stoom) wordt in de andere opgezogen.

Welke bronnen van hete droge rots heeft Engeland?

Helaas is Engeland er niet bijzonder mee gezegend. De meeste afzettingen zijn geconcentreerd in Cornwall, waar reeds in 1985 geothermische experimenten werden uitgevoerd in een onderzoeksfaciliteit bij Rosmanowes, die inmiddels is gesloten.



Adviseurs die deze experimenten begeleidden verklaarden dat "opwekking van elektrische energie uit hete droge rots waarschijnlijk technisch en commercieel onhaalbaar zou zijn op korte of middellange termijn, zowel in Cornwall als elders in Engeland".

[113] Maar welke middelen zijn er beschikbaar? De grootste afzetting van hete, droge rots bevat een totale energie van 130.000 TWh, die volgens deskundigen realistisch gezien gedurende 800 jaar **1,1 kWh/d/p** aan elektriciteit zou kunnen leveren.

Andere gebieden in de wereld kunnen veelbelovende afzettingen van heet, droog gesteente hebben, zodat de geothermische opties ter plaatse moeten worden onderzocht. Maar voor Engeland zal geothermische energie helaas slechts een ondergeschikte rol kunnen spelen.

Gebruikt Southampton niet al geothermische energie? Hoeveel is dat?

Ja, het "Southampton Geothermal District Heating Scheme" was, althans in 2004, de enige geothermische verwarmingsinstallatie in Engeland. Het voorziet de stad van warm water. De geothermische bron maakt deel uit van een gecombineerd systeem voor verwarming, elektriciteit en koeling. Het levert warm en koud water aan de consument en voert elektriciteit naar het net. Geothermische warmte is goed voor ongeveer 15% van de 70 GWh aan warmte die het systeem jaarlijks levert. De bevolking van Southampton bedraagt bij de laatste telling 217445, dus 0,13 kWh/d per persoon in Southampton wordt opgewekt met geothermische energie.

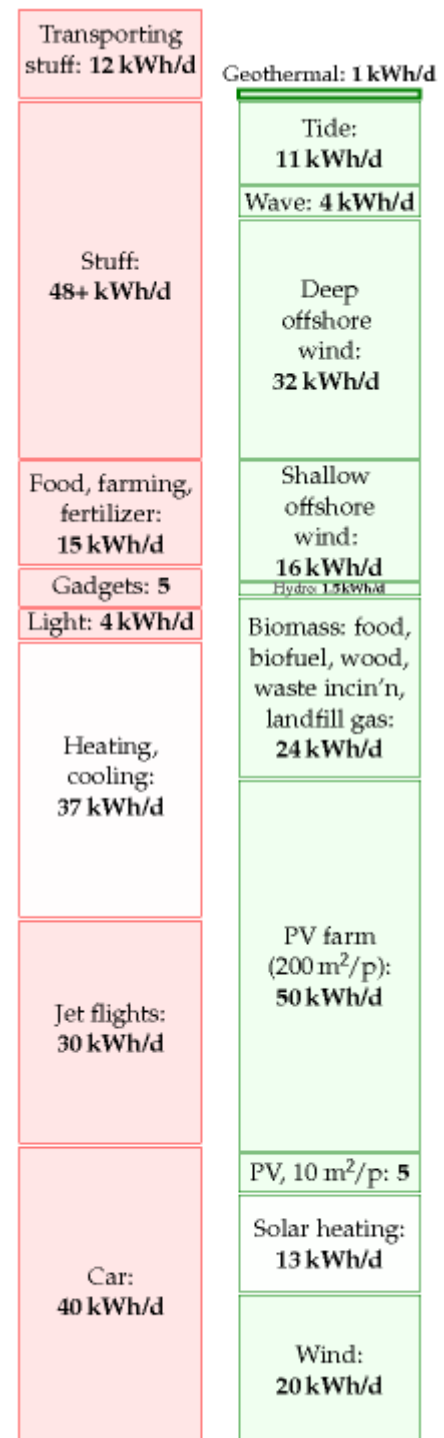


Fig.16.6: Geothermische energie

Opmerkingen en referenties

Pagina	
[111]	De warmteflux aan het oppervlak is 50 mW/m². 97 De warmtestroom aan het oppervlak is 50 mW/m². Het Massachusetts Institute of Technology (2006) geeft voor de VS een gemiddelde van 59 mW/m² , in een bereik van 25 mW tot 150 mW. Shepherd (2003) geeft 63 mW/m².
[113]	Het opwekken van elektrische energie uit heet droog gesteente zou op korte of middellange termijn waarschijnlijk technisch en commercieel niet haalbaar zijn. 98 "Het is onwaarschijnlijk dat het opwekken van elektrische energie uit heet droog gesteente in het Verenigd Koninkrijk technisch of commercieel levensvatbaar is". Quelle: MacDonald et al. (1992). Zie ook Richards et al. (1994).
[113]	De grootste afzetting van heet droog gesteente - De grootste schatting van de hete droge rotsvoorraad in het VK ... zou denkbaar 1,1 kWh per dag per persoon aan elektriciteit kunnen leveren gedurende ongeveer 800 jaar. Quelle: MacDonald et al. (1992).
[113]	Andere gebieden in de wereld hebben wellicht veelbelovende afzettingen van hete, droge stenen- Andere plaatsen in de wereld hebben meer veelbelovende hete droge rotsen. Er bestaat een uitstekende studie (Massachusetts Institute of Technology, 2006) waarin de hete, droge steenvoorraden van de VS worden beschreven. Een andere, meer speculatieve benadering, die in de jaren zeventig door de Sandia National Laboratories is bestudeerd, bestaat erin een gat te boren naar het magma van 600-1200 °C, ongeveer 15 km diep, en daar de energie uit te halen. De website www-magma-power.com berekent dat de energie in magma poelen onder de VS zou kunnen voorzien in het Amerikaanse energieverbruik voor 500-5000 jaar en economisch winbaar zou zijn.
[114]	Southampton geothermisch stadsverwarmingssysteem - Southampton Geothermisch stadsverwarmingsplan. www-southampton.gov.uk.

17 defensie

Defensie en Universiteit

Elk kanon dat wordt gemaakt, elk oorlogsschip dat wordt gelanceerd, elke raket die wordt afgevuurd, betekent in laatste instantie een diefstal van hen die honger lijden en niet te eten hebben, van hen die het koud hebben en niet gekleed zijn. Deze wereld in wapens is niet alleen geld uitgeven. Het besteedt het zweet van zijn arbeiders, de genialiteit van zijn wetenschappers, de hoop van zijn kinderen.

President Dwight D. Eisenhower - April, 1953

De energiekosten van defensie

Laten we eens schatten hoeveel energie ons leger nodig heeft.



In 2007-8 bedroeg het aandeel van de defensiebegroting in de totale Britse overheidsuitgaven £ 33 miljard / £ 587 miljard = 6%. Laten we de uitgaven voor terrorismebestrijding en inlichtingen erbij rekenen (2,5 miljard euro, en stijgend). Een ruwe schatting zou kunnen zijn dat 6% van deze kosten aan energie wordt besteed (6% is het aandeel van het BNP dat aan energie wordt besteed) en dat de energiekosten 2,7 pence per kWh bedragen (2,7 pence is de gemiddelde prijs van energie). Hieruit berekenen wij: 80 TWh per jaar gaat naar defensie, de fabricage van munitie, bommen en kernwapens, de fabricage van materieel om munitie, bommen en kernwapens af te leveren, en kazerneschreeuwen om fit te blijven voor de volgende ronde van goed-tegen-kwaad. In onze voorkeurseenheden is dat **4 kWh/d per persoon**.

De kosten van nucleaire verdediging

De financiële uitgaven van de VS voor de ontwikkeling en productie van kernwa-

pens van 1645 tot 1996 bedroegen 5,5 triljoen dollar (gerekend in dollars van 1996).

De uitgaven voor kernwapens waren in deze periode hoger dan de overheidsuitgaven voor onderwijs, landbouw, arbeid en welzijn, natuurbehoud en milieu, algemene wetenschap en ruimtevaart, gemeenschaps- en regionale ontwikkeling (inclusief rampenbestrijding), politie en energie samen.

Nogmaals, als we aannemen dat 6% hiervan naar energie ging tegen 5 dollarcent per kWh, komt dat neer op 26.000 kWh per Amerikaan alleen al voor hun kernwapenbezit, of **1,4 kWh/d per Amerikaan** (verdeeld over 250 miljoen Amerikanen gedurende 51 jaar).



Welke energie zou er naar de gelukkigen zijn gegaan als al die kernwapens waren ingezet? [116] De energie van de grote thermonucleaire bommen van de VS en de USSR wordt gemeten in megatonnen TNT. Een ton TNT is 1200 kWh. De atoombom die Hiroshima verwoestte had een energie van 15.000 ton TNT (18 miljoen kWh). Een megatonbom levert een energie van 1,2 miljard kWh. Afgeworpen op een stad van een miljoen mensen levert zo'n bom een energiegave op van 1200 kWh per persoon, wat overeenkomt met 120 liter benzine per persoon. De totale explosieve kracht van het Amerikaanse nucleaire arsenaal bedraagt momenteel 2400 megaton, in 10.000 kernkoppen. In de goede oude tijd, toen men defensie nog serieus nam, was het 20.000 megaton. Die bommen zouden, als ze gebruikt waren, 100.000 kWh energie per Amerikaan hebben opgeleverd. Dat is 7 kWh/d per persoon over 40 jaar - vergelijkbaar met alle elektrische energie die in Amerika door kernenergie wordt opgewekt.

Energiekosten van nucleair materiaal voor bommen

Het meest gebruikte bommateriaal is plutonium, waarvan de VS 104 ton hebben geproduceerd, en hoogverrijkt uranium (HEU), waarvan de VS 994 ton hebben geproduceerd. Voor de productie ervan is energie nodig.

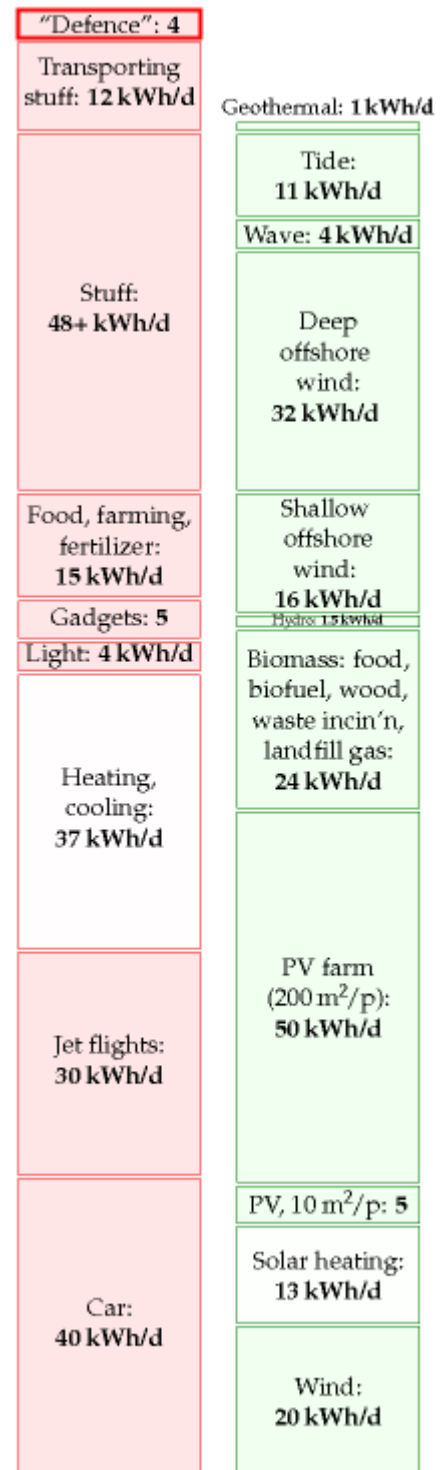
De meest efficiënte plutoniumfabrieken gebruiken 24.000 kWh thermische energie om 1 g plutonium te produceren. De directe energiekosten van de 104 ton plutonium (1945-1996) bedroegen dus ten minste 2,5 triljoen kWh, wat neerkomt op 0,5 kWh/d per persoon (verdeeld over 250 miljoen Amerikanen).

De belangrijkste bijdrage van energie bij de productie van HEU zijn de kosten van verrijking. Het werk bestaat erin de ^{235}U van de ^{238}U in natuurlijk uranium te scheiden om een eindproduct te krijgen dat rijker is aan ^{235}U . De Amerikaanse productie van 994 ton hoogverrijkt uranium (totaal 1945-1996) had een energiekost van 0,1 kWh/d per persoon.

"Trident creëert banen." Q24²⁴ Nou, dat geldt ook voor het opnieuw bestraten van onze scholen met asbest, maar dat betekent niet dat we dat moeten doen!

Marcus Brigstocke

Fig.17.1: De energiekosten van defensie in Engeland: een geschatte 4 kWh per dag per persoon.



Universiteiten

Volgens het Times Higher Education Supplement (van 30.3.2007) verbruiken de Britse universiteiten 5,2 miljard kWh per jaar. Voor de hele bevolking is dat **0,24 kWh/d per persoon**.

24) Q24 Trident is een Amerikaans-Engels kernwapenproject met kernkoppen die onderzeeërs kunnen afvuren.

[117] Hoger onderwijs lijkt dus aanzienlijk minder energie te vergen dan defensieve oorlogsspelletjes.

Er zijn wellicht nog andere energiegerelateerde overheidsdiensten die kunnen worden besproken, maar ik zal onze race tussen de rode en groene stapel hier staken.

[118] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[115]	Defensiebegroting van de Britse regering 100 militaire energiebegroting. De Britse begroting is te vinden op [yttg7p]; defensie krijgt £33,4 miljard [fcqfw] en inlichtingen en terrorismebestrijding £2,5 miljard per jaar [2e4fcs]. Volgens p14 van de Government's Expenditure Plans 2007/08 [33x5kc] is het "totale middelenbudget" van het Department of Defence een groter bedrag, namelijk £39 miljard, waarvan £33,5 miljard gaat naar "provision of defence capability" en £6 miljard naar "armed forces pay and pensions and war pensions". Een uitsplitsing van deze begroting is hier te vinden: [35ab2c]. Zie ook [yg5fsj], [yfgina], en www.conscienceonline.org.uk. Het energieverbruik van het Amerikaanse leger wordt gepubliceerd: "Het ministerie van Defensie is de grootste energieverbruiker in de Verenigde Staten. In 2006 gaf het 13,6 miljard dollar uit om 110 miljoen vaten petroleumbrandstof [ruwweg 190 miljard kWh] en 3,8 miljard kWh elektriciteit aan te kopen" (Dept. of Defense, 2008). Dit cijfer beschrijft het directe gebruik van brandstof en elektriciteit en omvat niet de belichaamde energie in het speelgoed van het leger. Gedeeld door de Amerikaanse bevolking van 300 miljoen, komt dit neer op 1,7 kWh/d per persoon.
[115]	De Amerikaanse financiële uitgaven voor de ontwikkeling en productie van kernwapens van 1945 tot 1996 bedroegen \$5,5 triljoen - De financiële uitgaven van de VS voor de productie en inzet van kernwapens bedroegen van 1945 tot 1996 5,5 triljoen dollar (in dollars van 1996). Bron: Schwartz (1998).
[116]	De directe energiekosten voor plutonium 101 energiekosten van plutoniumproductie. [slbae].
[116]	hoogverrijkt uranium (HEU), waarvan de VS 994 ton produceerden. - De productie van 994 ton HEU door de VS... Materiaal verrijkt tot tussen 4% en 5% ²³⁵U wordt laagverrijkt uranium (LEU) genoemd. 90% verrijkt uranium wordt hoogverrijkt uranium (HEU) genoemd. Het verrijken van uranium vanuit zijn natuurlijke toestand tot 5% LEU vergt drie keer zoveel werk als het verrijken van LEU tot 90% HEU. De kernenergie-industrie meet deze energiebehoeften in een eenheid die de scheidende arbeideenheid (SWU) wordt genoemd. Om een kilogram ²³⁵U als HEU te produceren zijn 232 SWU nodig. Om 1 kg ²³⁵U te maken als LEU (in 22,7 kg LEU) is ongeveer 151 SWU nodig. In beide gevallen wordt uitgegaan van natuurlijk uranium (0,71% ²³⁵U) en wordt verarmd uranium met 0,25% ²³⁵U verwijderd. Op de commerciële splijtstofmarkt wordt een SWU gewaardeerd op ongeveer 100 USD. Er is ongeveer 100 000 SWU verrijkt uranium nodig om een typische commerciële kernreactor van 1000 MW gedurende één jaar van brandstof te voorzien. Momenteel worden twee uraanverrijkingsmethoden commercieel gebruikt: gasdiffusie en gascentrifuge. Het gasdiffusieproces verbruikt ongeveer 2500 kWh per SWU, terwijl moderne gascentrifuge-installaties slechts ongeveer 50 kWh per SWU nodig hebben. [yh45h8], [t2948], [2ywwze]. Een moderne centrifuge produceert ongeveer 3 SWU per jaar. De productie van 994 ton hoogverrijkt uranium door de VS (het totaal van de VS, 1945-1996) kostte 230 miljoen SWU, wat neerkomt op 0,1 kWh/d per persoon (uitgaande van 250 miljoen Amerikanen, en uitgaande van 2500 kWh/SWU als de kosten van diffusieverrijking).

18 slotconclusie

Kunnen we leven van hernieuwbare energiebronnen?

"Defence": 4	Geothermal: 1 kWh/d
Transporting stuff: 12 kWh/d	
Stuff: 48+ kWh/d	Tide: 11 kWh/d
	Wave: 4 kWh/d
	Deep offshore wind: 32 kWh/d
Food, farming, fertilizer: 15 kWh/d	Shallow offshore wind: 16 kWh/d
Gadgets: 5	Hydro: 15 kWh/d
Light: 4 kWh/d	Biomass: food, biofuel, wood, waste incin'n, landfill gas: 24 kWh/d
Heating, cooling: 37 kWh/d	
Jet flights: 30 kWh/d	PV farm (200 m ² /p): 50 kWh/d
	PV, 10 m ² /p: 5
	Solar heating: 13 kWh/d
Car: 40 kWh/d	Wind: 20 kWh/d

De rode 'schoorsteen' in Fig.18.1 telt **195 kWh per dag per persoon**. De groene schoorsteen telt **180 kWh/d/p**. Een nauwe race! Maar vergeet niet: bij de berekening van de groene stapel hebben we alle economische, sociale en milieubeperkingen genegeerd. Ook kunnen sommige van onze groene bijdragen onverenigbaar zijn met andere: Onze PV-panelen en warmwatercollectoren concurreren om onze daken, onze PV-boerderijen op 5% van ons land kunnen concurreren met energiegewassen die we op 75% van ons landoppervlak hadden ingezaaid. Als we slechts één van onze grotere groene bijdragen kwijt-raken - bijvoorbeeld als we besluiten dat off-shore in diep water geen optie is, of dat het vullen van 5% van het land met PV-parken financieel niet haalbaar is tegen € 200.000 per persoon - dan zou de productie niet langer voldoende vergelijkbaar zijn met de vraagzijde.

Zelfs als onze rode consumptiestapel nu kleiner was dan onze groene productiestapel, zou dat nog niet betekenen dat de energietotalen met elkaar overeenkomen. Je kunt geen videocamera op kattenvoer laten lopen, of een kat uit een windturbine voeden. Energie bestaat in verschillende vormen - chemisch, elektrisch, kinetisch, thermisch, enz. Wil een duurzaam energieplan werken, dan moeten zowel de vormen als de bedragen van geleverde en benodigde energie met elkaar overeenstemmen. De omzetting van energievormen in elkaar - van chemisch naar elektrisch in een gascentrale, van elektrisch naar chemisch in een waterstofcentrale - gaat gewoonlijk

Fig.18.1: De stand van zaken, met alle traditionele hernieuwbare energiebronnen

gepaard met aanzienlijke verliezen van bruikbare energie. Op dit belangrijke detail komen wij terug in hoofdstuk 27, waarin enkele energieplannen worden beschreven die zouden kunnen werken.

Hier zullen wij onze schattingen van verbruik en productie nog eens bekijken, ze vergelijken met officiële gemiddelden en met schattingen van anderen, en bespreken hoeveel energie hernieuwbare bronnen op aannemelijke wijze kunnen leveren in een land als Engeland.

Wij zullen in dit hoofdstuk de volgende vragen behandelen:

1. Is de grootte van de rode stapel redelijk correct? Wat is het gemiddelde verbruik in Engeland? Wij zullen kijken naar de officiële consumptiecijfers van Engeland, en die van enkele andere landen. [120]
2. Ben ik oneerlijk geweest tegenover hernieuwbare energiebronnen door hun potentieel te onderschatten? Wij zullen de ramingen in de groene stapel vergelijken met gepubliceerde ramingen van erkende organisaties en instituten.
3. Wat gebeurt er met de groene stapel als we ook rekening houden met sociale en economische effecten?

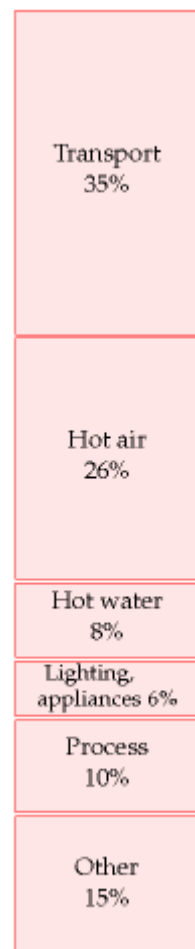
Reflecties op rood

Onze schatting van het energieverbruik van een gemiddeld welgesteld persoon (Fig.18.1) was **195 kWh/d**. Inderdaad, veel mensen hebben zoveel energie nodig, en nog veel meer streven ernaar. De gemiddelde Amerikaan verbruikt **250 kWh/d**. Als wij allemaal onze consumptienormen zouden optrekken tot het Amerikaanse niveau, zou de groene productiestapel in vergelijking daarmee beslist op een dwerg lijken.

Hoe zit het met de gemiddelde Europeaan en de gemiddelde Brit? Het gemiddelde verbruik van primaire energie (d.w.z. brandstoffen plus wind en waterkracht) in Europa bedraagt **125 kWh/d per persoon**. Het VK-gemiddelde bedraagt eveneens **125 kWh/d/p**.

In deze officiële cijfers zijn twee energiestromen helemaal niet opgenomen. Ten eerste wordt de grijze energie van ingevoerde goederen (de energie die wordt gebruikt om deze goederen te produceren) in het geheel niet meegerekend. Wij daarentegen hadden dit aandeel in [hoofdstuk 15](#) op 40 kWh/d/p geraamd.

Fig.18.2: *Energieverbruik uitgesplitst naar gebruik, volgens "Dept. for Trade and Industry"*



Ten tweede wordt bij "primaire energie" alleen gekeken naar industriële energiestromen en wordt geen rekening gehouden met de natuurlijke intrinsieke energie in voedsel: energie die oorspronkelijk door fotosynthese is opgevangen.

Een ander verschil tussen de rode stapel zoals wij die hebben samengesteld en de algemene nationale statistieken is dat wij in de meeste hoofdstukken de neiging hebben energieverliezen bij de omzetting van de ene vorm van energie in de andere, alsmede de inspanning voor het vervoer van de energie, te verwaarlozen. Bij de raming voor de automobielsector werd bijvoorbeeld alleen rekening gehouden met de energie in benzine, niet met de energie die in de raffinaderij wordt gebruikt om uit ruwe olie benzine te maken of met de energie die wordt gebruikt om de olie naar de raffinaderij of de benzine naar het benzinestation te vervoeren. In de nationale statistieken wordt echter rekening gehouden met het totale verbruik vóór eventuele verliezen. De omzettingsverliezen vertegenwoordigen ongeveer 22% van de nationale energiebehoefte. Het meeste gebeurt in krachtcentrales. De transmissieverliezen op het elektriciteitsnet slokken 1% van het nationale totaal op.

Bij het bouwen van de rode stapel hadden we ons afgevraagd hoeveel energie een doorsnee rijk persoon verbruikt. Heeft deze benadering ons idee over het belang van individuele activiteiten beïnvloed? Laten we nog eens naar enkele officiële cijfers kijken. Fig.18.2 toont de uitsplitsing van het energiegebruik naar eindgebruik. De twee belangrijkste categorieën zijn vervoer en verwarming (hete lucht en warm water). Deze twee categorieën domineren ook onze stapel. Dat is goed om mee te beginnen.

Laten we het vervoer eens nader bekijken. In onze rode stapel stelden we vast dat autorijden (aan 50 km per dag) en vliegen (naar Kaapstad één keer per jaar) ongeveer evenveel bijdragen. **Tabel.18.3** toont het relatieve belang van de verschillende vervoerswijzen in de nationale balans. Op een nationaal gemiddelde draagt vliegen minder bij dan autorijden.

[121]

Tabel.18.3: *Verdeling van het energieverbruik in 2006 per vervoerswijze, in kWh/d per persoon. Bron: Dept. for Transport (2007)*

Weg	olie	22,5
Spoor	olie	0,4
Water	olie	1,0
Vliegende	olie	7,4
Alle modi	Elektriciteit	0,4
Totaal energieverbruik vervoer		31,6

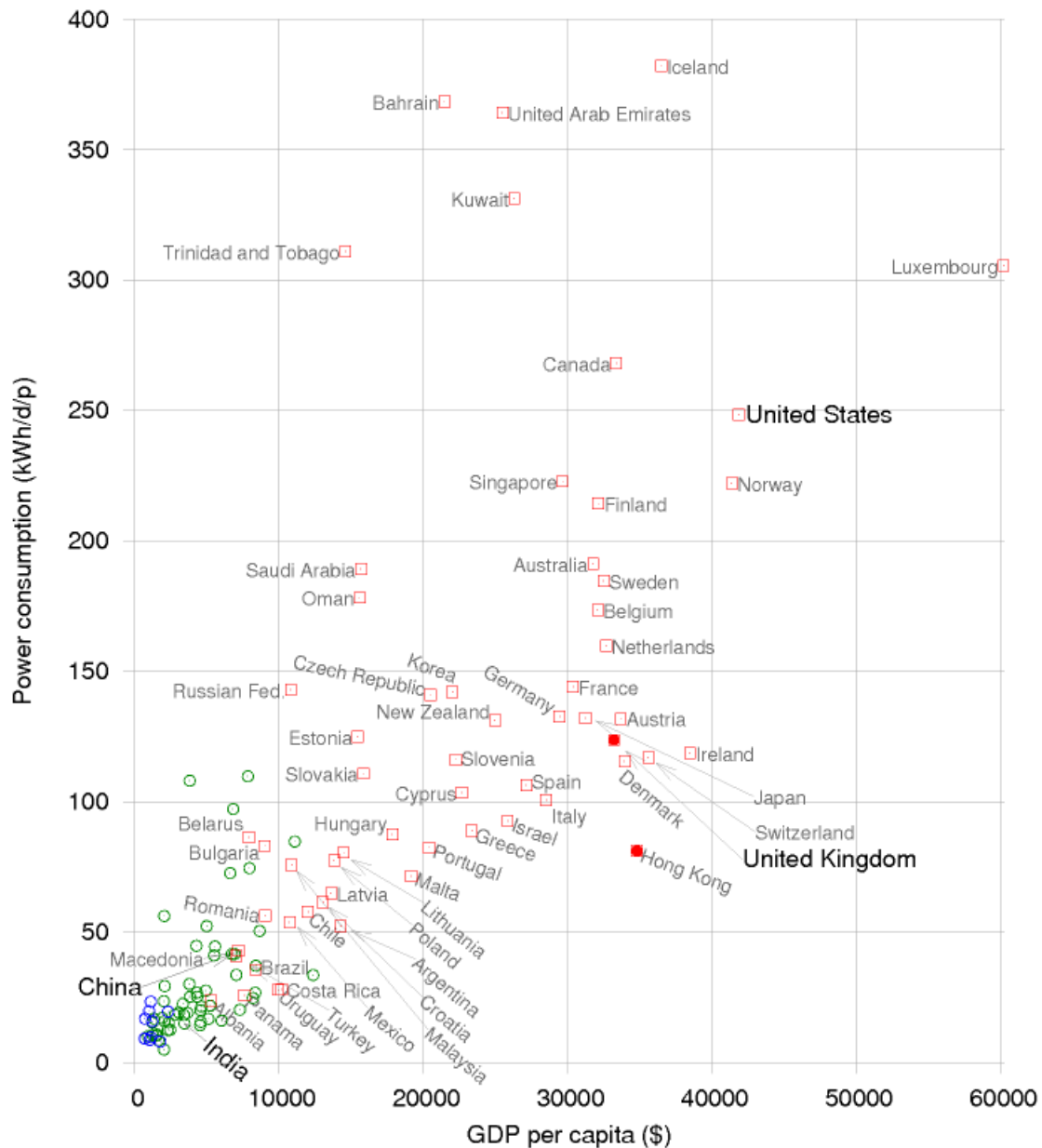


Fig.18.4: *Energieverbruik per hoofd van de bevolking versus BNP per hoofd van de bevolking, in koopkrachtequivalenten van de Amerikaanse dollar. Vierkanten geven landen aan met hoge ontwikkelingsnormen, cirkels met gemiddelde of lage.*

Fig.30.1 (blz. [251]) toont dezelfde gegevens op een logaritmische schaal.

[122] Hoe verhouden de Engelse consumptiestatistieken zich internationaal?

Fig.18.4 toont het energieverbruik van veel landen en regio's, afgezet tegen hun Bruto Nationaal Product (BNP): hoe hoger het BNP van een land (per hoofd van de bevolking), hoe hoger het verbruik per hoofd van de bevolking. Engeland is een vrij typisch land met een hoog BNP, omringd door Duitsland, Frankrijk, Japan, Australië, Ierland, Zwitserland en Denemarken. De enige opmerkelijke uitzondering

op de regel "groot BNP = groot energieverbruik" is Hong Kong: zijn BNP per hoofd van de bevolking is vergelijkbaar met dat van het VK, maar zijn energieverbruik is 80 kWh/d/p.



Fig.18.5: Hong Kong. Foto door Samuel Louie en Carol Spears.

De boodschap die ik uit deze cijfers trek is dat Engeland een vrij typisch Europees land is, zodat het ook een goed studieobject is voor de vraag: "Hoe kan een land met een hoge levensstandaard zijn energiesysteem duurzaam maken?"

Bespiegelingen over Groen

Men zegt vaak dat Engeland hernieuwbare energie in overvloed heeft. Ben ik gemeen geweest tegen groen? Zijn mijn cijfers een hoop onzin? Heb ik duurzame productie ondergewaardeerd? Laat ik eerst mijn groene cijfers vergelijken met enkele ramingen die ik heb gemaakt in de publicatie "*The role of nuclear power in a low carbon economy*". Vermindering van de CO₂-uitstoot - *kernenergie en de alternatieven*" door de *Commissie voor Duurzame Ontwikkeling*. Merk op dat, hoewel het SDC zeer positief is over hernieuwbare energie ("We hebben grote getijden-, golf-, biomassa- en zonne-energiebronnen"), alle ramingen in de SDC-publicatie kleiner zijn dan de mijne. (Om preciezer te zijn, het geraamde totaal van alle duurzame energiebronnen in de SDC-publicatie is lager dan mijn totaal). In de SDC-publicatie worden ramingen geciteerd uit vier bronnen (IEE, Tyndall, IAG en PIU, zie hieronder). In fig.18.6 worden mijn ramingen vergeleken met deze vier bronnen en de cijfers van het Centre for Alternative Technology (CAT). Hier volgt een beschrijving van elke bron:

My estimates	IEE	Tyndall	IAG	PIU	CAT
Geothermal: 1 kWh/d					
Tide: 11 kWh/d	Geothermal: 10 kWh/d				
Wave: 4 kWh/d	Tide: 2.4	Tide: 3.9	Tide: 0.09	Tide: 3.9	Tide: 3.4
	Wave: 2.3	Wave: 2.4	Wave: 1.5	Wave: 2.4	Wave: 11.4
Deep offshore wind: 32 kWh/d					
Shallow offshore wind: 16 kWh/d	Offshore: 6.4	Offshore: 4.6	Offshore: 4.6	Offshore: 4.6	Offshore: 21 kWh/d
Hydro: 1.5 kWh/d		Hydro: 0.08			Hydro: 0.5
Biomass: food, biofuel, wood, waste incin'n, landfill gas: 24 kWh/d	Wastes: 4	Energy crops, waste: 2	Energy crops, waste, landfill gas: 3	Energy crops, waste incin'n, landfill gas: 31 kWh/d	Biomass fuel, waste: 8
PV farm (200 m ² /p): 50 kWh/d					
PV, 10 m ² /p: 5		PV: 0.3	PV: 0.02	PV: 12	PV: 1.4
Solar heating: 13 kWh/d					Solar heating: 1.3
Wind: 20 kWh/d	Wind: 2	Wind: 2.6	Wind: 2.6	Wind: 2.5	Wind: 1

Figuur 18.6.: *Schattingen van theoretische of praktische hernieuwbare bronnen in het VK, door het Institute of Electrical Engineers, het Tyndall Centre, de Interdepartemental Analysts Group, en de Perfor en de voorstellen van het Centrum voor Alternatieve Technologie van het "Island Britain"-plan voor 2027.*

IEE Het Institute of Electrical Engineers publiceerde in 2002 een verslag over hernieuwbare energie - een overzicht van de mogelijke bijdragen van hernieuwbare energiebronnen in het VK. De tweede kolom van figuur 18.6 toont het "technisch potentieel" van een verscheidenheid van hernieuwbare technologieën voor de opwekking van elektriciteit in het VK - "een bovengrens die waarschijnlijk nooit zal worden bereikt, zelfs niet met vrij drastische veranderingen in de structuur van onze samenleving en economie". Volgens het IEE bedraagt het totaal van het

technisch potentieel van alle duurzame energiebronnen ongeveer 27 kWh/d per persoon.[123]

Tyndall Het *Tyndall Centre* raamt de totale haalbare hernieuwbare energiebron op 15 kWh per dag per persoon.

IAGDe schattingen van de *Interdepartmental Analysts Group* van hernieuwbare energiebronnen houden rekening met economische beperkingen. Hun totale praktische en economische hulpbron (bij een kleinhandelsprijs van 7p/kWh) bedraagt 12 kWh per dag per persoon.

PIUT In de kolom "PIU" staat het "indicatieve potentieel voor hernieuwbare elektriciteitsopwekking" uit de bijdrage van het DTI aan de PIU-evaluatie in 2001. Voor elke technologie vermeld ik het "praktische maximum", of, als er geen praktisch maximum is gegeven, het "theoretische maximum".

CAT In de laatste kolom staan de cijfers van het "Island Britain"-plan van het Centre for Alternative Technology, Helweg-Larsen en Bull (2007).

[124] Bio-aangedreven Europa

Soms vragen mensen me: "Leefden we vóór de industriële revolutie niet wonderwel van hernieuwbare energie?" Ja, maar er waren toen twee belangrijke dingen anders: levensstijl en bevolkingsdichtheid.

Laten we de klok 400 jaar terugdraaien: Europa leeft bijna uitsluitend van duurzame bronnen: Voornamelijk hout en landbouw, enigszins aangevuld met wind-, getijde- en hydro-elektrische energie. Geschat wordt dat de levensstijl van de gemiddelde persoon in die tijd een energiebehoefte had van 20 kWh/d. Het houtverbruik per persoon bedroeg 4 kg, waarvoor één hectare (10.000 m²) bos per persoon nodig was. In de jaren 1700 was het landoppervlak per persoon 52.000 m², akkerland, weiland en bos. Vandaag is er slechts 4000 m² land voor elke Brit, dus zelfs als we onze levensstijl zouden verlagen tot middeleeuws niveau en Engeland volledig zouden herbebossen, zouden we hier niet op duurzame wijze kunnen leven. Onze bevolkingsdichtheid is veel te hoog.

[125] Groene ambities ontmoeten sociale realiteit

Fig.18.1 is somber nieuws. Ja, technisch gezien heeft Engeland "grote" duurzame energie. Maar realistisch gezien denk ik niet dat Engeland kan leven van zijn eigen hernieuwbare energiebronnen - althans niet op de manier waarop we nu leven. Ik ben ook gedeeltelijk tot deze conclusie gekomen door het koor van tegenstanders dat elk groot project voor duurzame energie toejuicht. Mensen houden van hernieuwbare energiebronnen zolang ze niet groter zijn dan een vijgenblad. Als er één ding is waar de Britten goed in zijn, is het "nee" zeggen.



Fig.18.7a: (links) Score na toevoeging van alle hernieuwbare energiebronnen, en dan was er een openbare raadpleging....

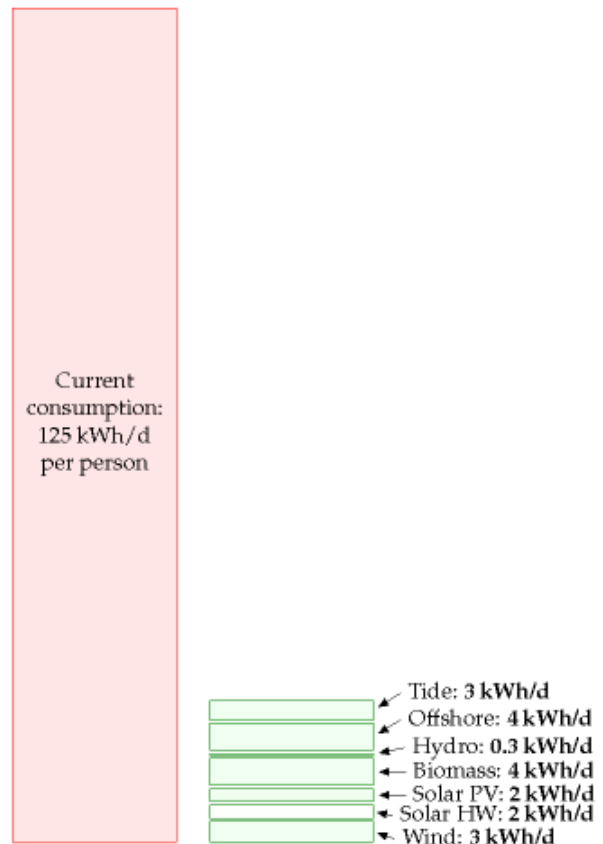


Fig 18.7b: (boven) Na de openbare raadpleging. Ik vrees dat het maximum dat Groot-Brittannië ooit uit hernieuwbare energiebronnen zal halen, in de buurt ligt van 18 kWh/d per pers. (Het cijfer aan de linkerkant, 125 kWh/d per persoon, is overigens het gemiddelde Britse verbruik, import niet meegerekend, en zonne-energie die via de voedselproductie wordt verkregen, buiten beschouwing gelaten).

Windmolenparken?

"Nee, het zijn lelijke luidruchtige dingen."

Zonnepanelen op daken?

"Nee, ze bederven de visuele aangenaamheid van de straat."

Meer herbebossing?

"Nee, het ruïneert het landschap"

Vuilverbranding?

"Nee, ik maak me zorgen over gezondheidsrisico's, verkeerstoename, uitlaatgassen en lawaai"

Hydro-elektrische energie?

"Ja, maar geen grote planten - ze vernietigen het milieu."

Off-shore wind?

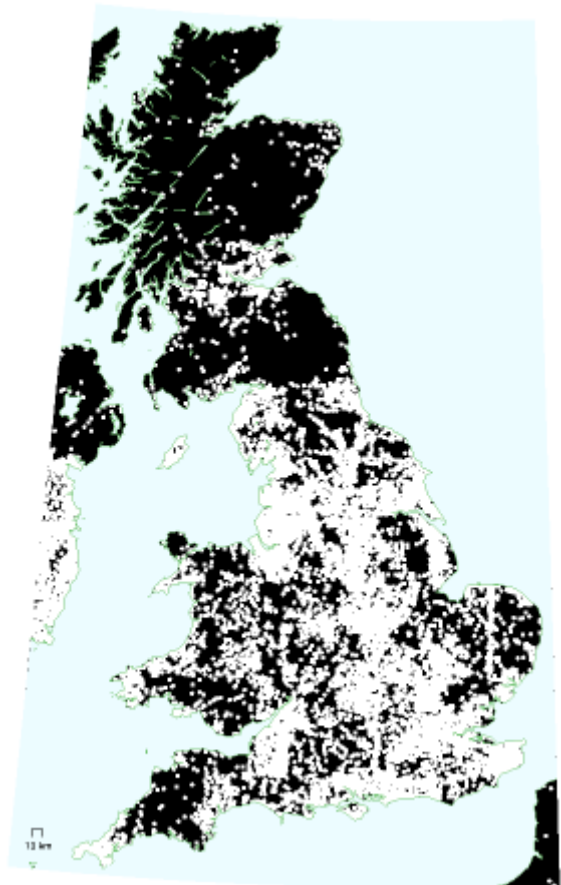
"Nee, ik maak me meer zorgen over de hoogspanningskabels aan de kust dan over een nazi-invasie."

Golven of geothermisch?

"Nee, veel te duur"

Na al deze bezwaren vrees ik dat Engeland hooguit wat duurzame energie zal krijgen, zoals te zien is in fig.18.7b rechtsonder.

Fig.18.8: *(Rechts) Waar de wildernis is. Een van de redenen tegen windmolenparken is het lawaai dat ze maken. Daarom heb ik alle gebieden binnen een straal van 2 km van een nederzetting wit gekleurd. De zwarte gebieden zijn waarschijnlijk grotendeels uitgesloten omdat dergelijke rustige plaatsen gespaard moeten blijven van industrialisatie. Afwikkelingsgegevens van ww-w-openstreetap-org (404)*



[126] Fig.18.8 geeft een leidraad voor iedereen die in Engeland een windmolenpark wil opzetten. Op de kaart heb ik in het wit een verboden gebied met een straal van 2 km rond elke stad, elk dorp en elk gehucht getekend. Deze witte gebieden zijn waarschijnlijk niet geschikt voor de ontwikkeling van windmolenparken omdat ze te dicht bij mensen liggen. In zwart heb ik alle gebieden gemarkeerd die verder dan 2 km van nederzettingen liggen. Deze gebieden zijn grotendeels uitgesloten voor de ontwikkeling van windmolenparken omdat ze te stil zijn, en het is belangrijk om stille plaatsen te vrijwaren van industrialisatie. Dus als u bezwaren tegen uw windmolenpark wilt vermijden, kies dan een stuk land dat noch wit noch zwart is.

Sommige van deze milieuactivisten, die een goed hart hebben maar verwarde geesten, zijn bijna een hinderpaal voor de aanpak van de klimaatverandering.

Malcolm Wicks, staatssecretaris van Energie

We zijn aan het einde gekomen van deel I. De veronderstelling was dat we geleidelijk een einde willen maken aan fossiele brandstoffen, om een of meer van de redenen die ik in [hoofdstuk 1](#) heb genoemd - klimaatverandering, continuïteit van de voorziening, enzovoort. Fig.18.9 laat zien hoeveel stroom we momenteel uit hernieuwbare energiebronnen en kernenergie halen. Het is slechts 4% van de totale vraag.

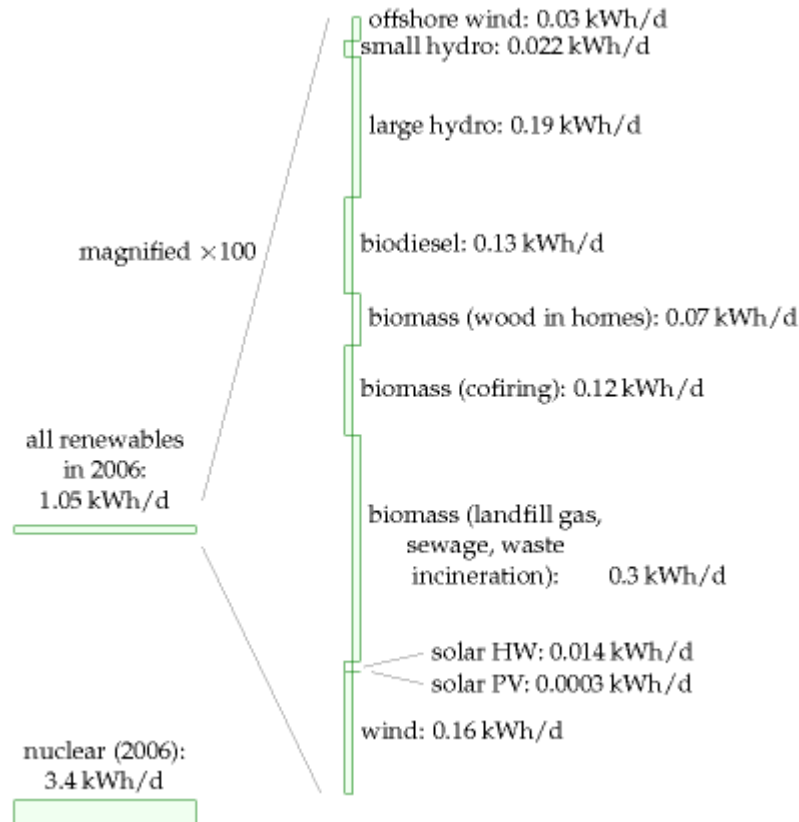


Fig.18.9: Productie van hernieuwbare energiebronnen en kernenergie in Engeland 2006. Alle outputs uitgedrukt per persoon, zoals gebruikelijk. De uitsplitsing van duurzame energiebronnen aan de rechterkant wordt in het verticale gedeelte 100-voudig vergroot.

Er zijn twee lessen die we uit dit deel I kunnen trekken:

1. om een verschil te maken, moeten installaties voor hernieuwbare energie ongeveer zo groot zijn als een land.

Elke in aanmerking genomen plant kan een bijdrage leveren in de orde van grootte van ons huidig verbruik, maar moet daarvoor ongeveer de grootte van een land hebben. Om een significante bijdrage van windenergie te krijgen, hebben we windmolenparken ter grootte van Wales gebruikt. Om een groot deel fotovoltaïsch te krijgen, hadden we de helft van de grootte van Wales nodig. Om een groot deel van de golfenergie bij te dragen, hebben wij golfparken geschetst over 500 km [127] kustlijn. Om energiegewassen met een grote bijdrage te oogsten, zijn wij uitgegaan van 75% van het totale land. Hernieuwbare centrales moeten op landgrootte worden ontworpen omdat hernieuwbare energiebronnen zo diffuus zijn. **Tabel.18.10** geeft een overzicht van de meeste vermogensdichtheden die we in deel I zijn tegengekomen. Het zou erg moeilijk zijn om de Engelse levensstijl alleen op hernieuwbare energiebronnen te handhaven. Een op hernieuwbare energie gebaseerde oplossing zou noodzakelijkerwijs grootschalig en ingrijpend zijn.

2. *Het zal niet gemakkelijk zijn om met een zinnig plan te komen dat alleen op hernieuwbare energiebronnen is gebaseerd. Als het ons ernst is met de afschaffing van fossiele brandstoffen, zullen de Britten moeten leren ergens "ja" tegen te zeggen. Inderdaad, niet alleen op iets, maar op heel veel dingen.*

In deel II vraag ik: "Als we geen duurzame energie kunnen gebruiken om in onze behoeften te voorzien, welke andere opties hebben we dan?"

Tabel.18.10: *Installaties van hernieuwbare energiebronnen moeten landsgrenzen bereiken, omdat de hernieuwbare energiebronnen zijn zo diffuus zijn.*

Vermogen per eenheid land of Eenheid van watergebied		
Wind (land)	2	W/m ²
Off-shore wind	3	W/m ²
Getijdenbekken	3	W/m ²
Getijdenstroom	6	W/m ²
Zonnepanelen	5-20	W/m ²
Regenwater (Hooglanden)	0,24	W/m ²
Hydro-elektrisch	11	W/m ²
Geothermisch	0,017	W/m ²

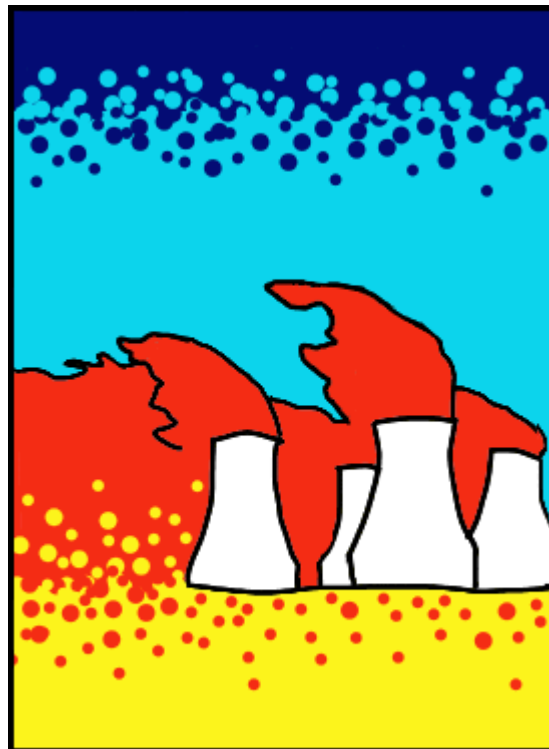
Opmerkingen en referenties

Pagina	
[120]	Het VK-gemiddelde bedraagt eveneens 125 kWh/d/p. – 104 Het gemiddelde energieverbruik in het VK is 125 kWh per dag per persoon. Dit cijfer is afkomstig uit het UNDP Human Development Report, 2007. Het DTI (nu DBERR) publiceert jaarlijks de Digest of United Kingdom Energy Statistics [uzek2]. Volgens DUKES bedroeg het totale verbruik van primaire energie in 2006 244 miljoen ton olie-equivalent, wat overeenkomt met 130 kWh per dag per persoon. Ik weet niet wat de reden is voor het kleine verschil tussen de UNDP- en de DUKES-cijfers, maar ik kan wel uitleggen waarom ik voor de iets kleinere van de twee heb gekozen: DUKES gebruikt dezelfde energieomzettingsconventie die ik op blz. 29 noem, waarbij één kWh chemische energie gelijk wordt gesteld aan één kWh elektrische energie, maar er is één kleine uitzondering: DUKES definieert "primaire energie" van kerncentrales als hun thermische energie, die in 2006 ongeveer 9 kWh/d/p bedroeg; dit werd omgezet in 3,4 kWh/d/p elektriciteit bij (38% efficiëntie). In mijn telling heb ik de elektriciteitsproductie gebaseerd op waterkracht, duurzame energiebronnen en kerncentrales; Tabel.18.10: Duurzame centrales moeten de landmaten bereiken omdat duurzame energiebronnen zo diffuus zijn. - 128 - dit kleine verschil in conventie verminderde het aandeel van kernenergie tot ongeveer 5 kWh/d/p.
[120]	De transmissieverliezen in het elektriciteitsnet slokken 1% van de totale nationale energie op - Verliezen in het elektriciteitstransmissienetwerk vloeien weg tot 1% van het totale nationale energieverbruik. Met andere woorden, de verliezen bedragen 8% van de opgewekte elektriciteit. Deze 8% is als volgt samengesteld: Ongeveer 1,5% gaat verloren in het hoogspanningssysteem over lange afstanden en 6% in lokale openbare nutsnetwerken. Bron: MacLeay et al. (2007).
[121]	Fig.18.4: 105Figure 18.4. Daten aus UNDP Human Development Report, 2007. [3a-v4s9]
[124]	Geschat wordt dat de levensstijl van een gemiddeld persoon in die tijd een energiebehoefte had van 20 kWh/d – 108 In de Middeleeuwen verbruikte de gemiddelde persoon voor zijn levensstijl een vermogen van 20 kWh per dag. Quelle: Malanima (2006).
[125]	de lelijke hoogspanningskabels die langs de kust komen baren me nog meer zorgen dan een Nazi invasie toen – 110 "Ik maak me meer zorgen over de lelijke elektriciteitsleidingen die aan land komen dan over een nazi-invasie." Quelle: [6frj55].

Deel II: toelichting

De energietransitie

Het verschil maken



19 grote stappen

Elke grote stap telt

Wij hebben vastgesteld dat de Britten hun huidige levensstijl niet kunnen volhouden met behulp van hun eigen hernieuwbare energiebronnen (tenzij zij land- of zeegebieden van landgrootte industrialiseren). Maar wat zijn nu onze opties als we willen afstappen van fossiele brandstoffen en duurzaam willen leven? Wij kunnen energie in evenwicht brengen door ofwel het verbruik te verminderen ofwel het aanbod te verhogen, of natuurlijk door beide samen te doen.

We moeten ons geen illusies maken. Om ons doel te bereiken, namelijk de geleidelijke afschaffing van fossiele brandstoffen, moeten wij onze consumptie sterk verminderen en ons aanbod sterk vergroten. Laat je niet misleiden door de mythe dat "elke kleine stap telt." Als iedereen een kleine stap zet, zetten we een kleine stap vooruit. We moeten veel meer doen. Wat nodig is, zijn grote veranderingen in consumptie en aanbod.



"We were going to have a wind turbine but they're not very efficient"

Afb.19.1: Herdruk met dank aan PRIVATE EYE / Robert Thompson [www-private-eye.co.uk](http://www.private-eye.co.uk) -

"Maar als 60 miljoen mensen allemaal een kleine bijdrage leveren, zal dat toch niet tot iets groots leiden?" Nee. Deze "als-iedereen" vermenigvuldiger machine is gewoon een middel om iets kleins groots te laten klinken. De "als-iedereen"-vermenigvuldigingsmachine spuugt inspirerende verklaringen uit van de vorm "als iedereen X zou doen, zou er genoeg energie/water/gas zijn voor Y" waarbij Y indrukwekkend klinkt. Is het verwonderlijk dat Y groot klinkt? Natuurlijk doet het dat niet. We kregen immers Y door X te vermenigvuldigen met het aantal mensen - 60 miljoen of zo. Hier is een voorbeeld uit de overigens zeer feitelijke *Blauwdruk voor een groene economie van de Conservatieve Partij*:

"Opladers voor mobiele telefoons hebben een ongebruikt vermogen van slechts ongeveer 1 W, maar als alle 25 miljoen opladers in het land ongebruikt aangesloten en ingeschakeld blijven, verbruiken ze 219 GWh elektriciteit, genoeg om 66.000 huizen een jaar lang van stroom te voorzien."

66.000? Wow, zoveel huishoudens! Zet je laders uit! 66.000 klinkt als veel, maar het gevoelige punt waarmee we dat moeten vergelijken is het aantal huishoudens dat volgens ons aan die besparing zou moeten deelnemen, 25 miljoen. 66.000 is slechts een kwart van een procent van 25 miljoen. Dus hoewel de bovenstaande verklaring waar is, zou het volgende een meer voorzichtige manier zijn om dezelfde kwestie te formuleren:

Als u de oplader van uw mobiele telefoon ongebruikt in het stopcontact laat zitten, verbruikt dat een extra kwart procent van het energieverbruik van uw huishouden.

Wat als iedereen dat doet?

Als *iedereen* de oplader van zijn mobiele telefoon ongebruikt in het stopcontact laat zitten, verbruikt dat een extra kwart procent van het totale huishoudelijke energieverbruik.

[131] De "als-iedereen"-vermenigvuldigingsmachine is een vervelend ding omdat het de aandacht van de mensen richt op 25 miljoen goudvissen in plaats van 25 miljoen haaien. De mantra "kleine veranderingen kunnen grote verschillen maken" is onzin wanneer hij wordt toegepast op klimaatverandering of energie. Het kan best waar zijn dat "de kleine bijdragen van veel mensen bij elkaar opgeteld iets groots opleveren" als al die "kleine bijdragen" op de een of andere manier worden samengevoegd tot één "grote" bijdrage - bijvoorbeeld als een miljoen mensen 10 euro doneren aan een slachtoffer van een ongeluk, dan krijgt het slachtoffer 10 miljoen. Dat is al iets "groots". Maar energie is iets anders. We gebruiken allemaal energie. Als wij dus een "grote verandering" in de totale consumptie willen bewerkstelligen, moet praktisch iedereen een "grote" verandering in zijn eigen consumptie bijdragen.

Daarom zijn grote veranderingen in consumptie en aanbod nodig. Het energieverbruik kan op drie manieren worden verminderd:

1. door vermindering van de bevolking (zie **Fig.19.2**)
2. door onze levensstijl te veranderen
3. door onze levensstijl te handhaven, maar de energie-intensiteit ervan te



Fig.19.2: Bevolkingsgroei en emissies ... Cartoon met dank aan Colin Wheeler.

De voetafdruk van elk individu kan niet tot nul worden herleid, maar de afwezigheid van een individu doet dat wel. Chris Rapley, voormalig directeur van de British Antarctic Survey

We hebben minder mensen nodig, geen groenere. *Daily Telegraph*, 24. Juli 2007

Democratie kan overbevolking niet overleven. Menselijke waardigheid kan overbevolking niet overleven. Isaac Asimov –

verminderen door "efficiëntie" en "technologie".

Het aanbod kan op drie manieren worden vergroot:

1. We kunnen afstappen van fossiele brandstoffen en investeren in "schone steenkool"-technologie. Oeps! Steenkool is een fossiele brandstof. Laat maar. Laten we dit idee eens bekijken. Als we steenkool "duurzaam" gebruiken (we zullen dat begrip zo dadelijk nader definiëren), hoeveel energie zou dat dan kunnen opleveren? Als we niet naar duurzaamheid kijken en alleen "voorzieningszekerheid" willen, zou steenkool dat dan kunnen bieden?
2. We kunnen investeren in kernsplitsing. Is de huidige nucleaire technologie "duurzaam"? Is het op zijn minst een brugtechnologie die 100 jaar meegaat?
3. Wij kunnen duurzame energiebronnen kopen, vragen of stelen van andere landen - maar vergeet niet dat de meeste landen zich in dezelfde situatie bevinden als Engeland en geen duurzame energiebronnen over hebben, en bovendien dat dit niet op magische wijze de hoeveelheid vereiste energievoorziening vermindert. Als wij hernieuwbare energie importeren om te voorkomen dat in ons land energieparken ter grootte van Wales worden gebouwd, zal iemand in een ander land een energiepark ter grootte van Wales moeten bouwen.

In de volgende zeven hoofdstukken wordt eerst besproken hoe het verbruik aanzienlijk kan worden verminderd, en vervolgens hoe het aanbod voldoende kan worden verhoogd om in dit verminderde, maar nog steeds "grote" verbruik te voorzien. In deze hoofdstukken zal ik niet alle goede ideeën noemen, maar alleen de grootste bespreken.

[132] The Simplified England

Om onze discussie te vereenvoudigen tot het essentiële onderdeel van de verbruiksvermindering, introduceer ik "vereenvoudigd Engeland" en het verbruik ervan als werkhypothese. Daarbij verwaarloos ik veel details en concentreer ik me op het grote geheel. Mijn vereenvoudigd Engeland verbruikt energie in slechts drie vormen:

Deze vereenvoudiging gaat voorbij aan een aantal zeer vermeldenswaardige details, zoals landbouw en industrie, en de grijze energie van ingevoerde goederen! Maar het zou een snel begrip mogelijk moeten maken van de essentiële zaken die nodig zijn om van fossiele brandstoffen af te komen. Verwarming, vervoer en elektriciteit zijn goed voor meer dan de helft van onze energiebehoeften. Als wij dus met een plan kunnen komen dat deze drie gebieden op een duurzame manier bestrijkt, hebben wij al een grote stap gezet in de richting van een meer gedetailleerd plan dat in de praktijk zal werken.

Als wij dit vereenvoudigde Engeland als uitgangspunt nemen, zal onze bespreking van de consumptie slechts drie gezichtspunten omvatten. Ten eerste, hoe kunnen we de vraag naar energie voor vervoer terugdringen en fossiele brandstoffen uit het vervoer bannen? Dat is het onderwerp van [hoofdstuk 20](#). Ten tweede, hoe kunnen we de vraag naar energie voor verwarming verminderen en fossiele brandstoffen uit de verwarming halen? Dat is het onderwerp van [hoofdstuk 21](#). Ten derde, hoe zit het met elektriciteit? [Hoofdstuk 22](#) behandelt de efficiëntie van het elektriciteitsgebruik.

Drie opties voor de voorziening - schone steenkool, kernenergie en duurzame energie uit andere landen - worden vervolgens behandeld in de [hoofdstukken 23, 24 en 25](#). Tenslotte wordt in [hoofdstuk 26](#) gekeken naar de effecten van fluctuaties in het verbruik en fluctuaties in de beschikbaarheid van hernieuwbare energiebronnen.

Nadat de opties voor verbruiksvermindering en aanbodverbetering in kaart zijn gebracht, bespreken wij in de [hoofdstukken 27 en 28](#) verschillende manieren om deze opties te combineren tot verschillende totaalconcepten die effectief voorzien in vervoer, verwarming en elektriciteit in dit vereenvoudigde Engeland.

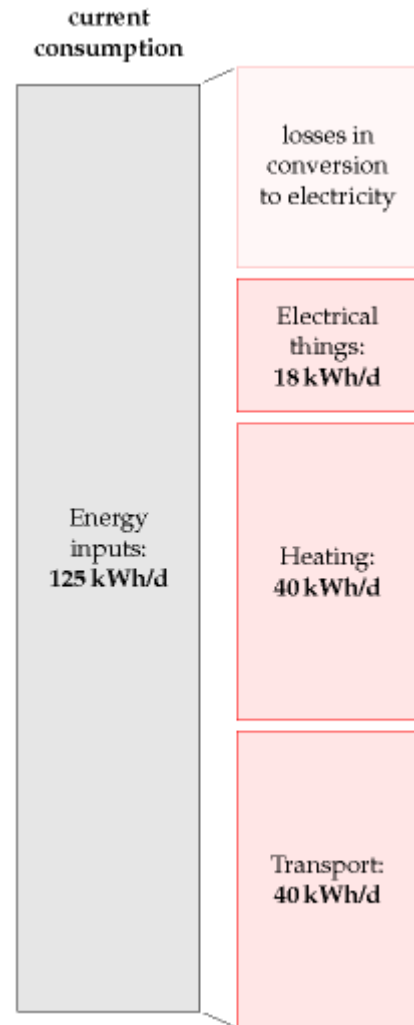


Fig.19.3: Huidige consumptie in "Vereenvoudigd Engeland 2008"

Ik zou talloze pagina's kunnen vullen met "50 tips over hoe iedereen kan bijdragen aan de energietransitie", maar ik denk dat de vereenvoudigende aanpak om alleen de drie vetste vissen eruit te pikken tot effectievere strategieën moet leiden.

Maar wat met alledaagse dingen? Zoals we in [deel I](#) zagen, is grijze energie in ingevoerde dingen misschien wel de grootste vis van allemaal! Ja, misschien is die vis inderdaad de "mammoet". Maar laat ik het bewerken van de mammoet terzijde schuiven, en onze aandacht richten op de dingen waarover wij directe controle hebben.

Dus, hier gaan we:

Laten we het hebben over vervoer, verwarming, en elektriciteit.

Voor de ongeduldige lezer

Wil je nu al het einde van het verhaal weten? Hier is een korte samenvatting, een voorproefje van deel II.

Ten eerste, we elektrificeren het vervoer. Overschakelen op elektriciteit maakt het vervoer onafhankelijk van fossiele brandstoffen en verhoogt ook de energie-efficiëntie. (Natuurlijk vergroot het ook onze behoefte aan groene stroom).

Ten tweede elektrificeren wij, als aanvulling op thermische zonneverwarming, de meeste systemen voor de verwarming van water en lucht binnenshuis door ze om te bouwen tot warmtepompen. Warmtepompen verwarmen met elektriciteit, maar zijn vier keer efficiënter dan conventionele elektrische ovens. Door deze elektrificatie van verwarmingssystemen in gebouwen neemt onze behoefte aan groene stroom verder toe.

In de derde stap wekken we alle groene stroom die we nodig hebben op uit een mix van vier bronnen: uit onze eigen hernieuwbare energiebronnen, misschien uit schone steenkool, misschien uit kernenergie, en tot slot - en dat is het beleefdste - uit hernieuwbare energiebronnen van andere landen.

Van de hernieuwbare energiebronnen in andere landen is zonne-energie in woestijngebieden de meest overvloedige optie. Zolang we vreedzame internationale samenwerkingsverbanden kunnen aangaan heeft zonne-energie in woestijnen van andere landen zeker de potentie om ons, die andere landen en iedereen te voorzien van 125 kWh per dag per persoon.

Nog vragen? Lees verder.

20 vervoer

Beter transport

Moderne voertuigtechnologie kan de klimaatveranderingsemissies beperken zonder het uiterlijk, het gevoel of de prestaties te veranderen die de eigenaars zijn gaan verwachten.

California Air Resources Board

Ongeveer een derde van onze energie wordt verbruikt voor vervoer. Kan technologie dit verbruik verminderen? In dit hoofdstuk gaan we in op manieren om de volgende twee doelstellingen te bereiken: Het verbruik zo veel mogelijk terugdringen en fossiele brandstoffen uit het vervoer weren.



Fig.20.1: Het uitgangspunt: een Lexus 'sadan'. De gemiddelde Engelse auto verbruikt 8,5 l/100 km, of 80 kWh per 100 km. Kan het beter?



In drie van de consumptiehoofdstukken van deel I hebben wij reeds aandacht besteed aan vervoer: Hoofdstuk 3 (auto's), hoofdstuk 5 (vliegtuigen), en hoofdstuk 15 (vracht over de weg en over zee). Het is belangrijk onderscheid te maken tussen twee soorten vervoer: Passagiersvervoer en vrachtvervoer. Onze eenheid voor personenvervoer is de passagierskilometer (p-km). Als een auto één persoon 100 km vervoert, voert hij 100 p-km transport uit. Als hij vier mensen over dezelfde afstand vervoert, presteert hij 400 p-km. Evenzo is onze eenheid van vrachtvervoer ton-km (t-km). Als een vrachtwagen 5 ton vracht 100 km vervoert, voert hij 500 t-km vrachtvervoer uit. Het energieverbruik van het personenvervoer zal worden gemeten in "kWh per 100 p-km" en dat van het vrachtvervoer in "kWh per t-km". (Deze

metingen zijn net omgekeerd aan het in Engeland gebruikelijke "mijl per gallon" (mpg) cijfer: terwijl wij de voorkeur geven aan voertuigen die veel mpg leveren, willen wij weinig kWh per 100 p-km voor het energieverbruik).

Laten we dit hoofdstuk beginnen met een bespreking van vervoer over land. Om te begrijpen hoe we energie kunnen besparen in dit proces, moeten we begrijpen waar de energie naartoe gaat in het vervoer over land. Drie sleutelbegrippen zijn hier van belang, en worden nader beschreven in Bijlage A.

1.

Bij vervoer over korte afstand, waarbij veel wordt gestart en gestopt, gaat de energie voornamelijk naar het optrekken van het voertuig en zijn inhoud. De belangrijkste strategie om energie te besparen in dit soort vervoer is dan ook om weinig te wegen en lange afstanden af te leggen tussen de haltes. Regeneratief remmen, waarbij energie wordt teruggewonnen wanneer het voertuig vertraagt, kan ook helpen. In het algemeen helpt het om langzamer en minder te rijden. **Fig.20.1:** Het uitgangspunt: een luxe sadan. De gemiddelde Engelse auto verbruikt 8,5 l/100 km, of 80 kWh per 100 km. Kan het beter? **[135]**

2. In het lange-afstandsverkeer met constante snelheid, met de trein of met de auto, verbruik je de meeste energie door wervelende lucht, omdat je de auto maar één keer hoeft op te trekken. Bij dit type vervoer zijn de belangrijkste strategieën om energie te besparen dan ook langzamer te rijden, minder te rijden en lange, dunne voertuigen te gebruiken.
3. bij alle vormen van vervoer is er een energieomzettingsketen die energie haalt uit een of andere brandstof en deze gebruikt om het voertuig voort te stuw. Deze energieketen kent onvermijdelijk inefficiënties. In een normale benzineauto bijvoorbeeld, wordt slechts 25% van de energie gebruikt om de auto voort te stuw, ongeveer 75% gaat verloren en verwarmt alleen de motor en de radiator. Een laatste strategie om het verbruik te verminderen bestaat er dus in deze energieomzettingsketen efficiënter te maken.

Deze overwegingen leiden ons tot zes principes voor het ontwerp en de invoering van voertuigen die de energie-efficiëntie van het vervoer over land verbeteren: a) de voetafdruk per persoon verkleinen; b) het gewicht per persoon verminderen; c) met constante snelheid rijden en remmen vermijden; d) langzamer rijden; e) minder rijden; f) de energie-omzettingsketen efficiënter maken. Wij zullen nu een aantal toepassingen van deze beginselen bespreken.



Fig.20.2: De Team Crocodile EcoAuto verbruikt 1,3 kWh per 100 km. Foto met dank aan Team Krokodil www-teamcrocodile.com

Hoe rol je beter

Een vaak geciteerde statistiek luidt zoiets als "slechts één procent van de gebruikte energie gaat naar de beweging van de bestuurder" - waarmee wordt geïmpliceerd dat als we maar slim genoeg zouden zijn, we auto's toch 100 keer efficiënter zouden kunnen maken? Het antwoord is ja, bijna, maar alleen als we de bovenstaande beginselen voor voertuigontwerp en voertuiggebruik op een extreme manier toepassen.

Een voorbeeld van extreem voertuigontwerp is de EcoAuto, die een kleine voetafdruk en lage hoogte heeft, en - als het doel het vestigen van nieuwe records is - voorzichtig wordt gereden met een lage en constante snelheid. De Team Crocodile Eco-car (**Fig.20.2**) heeft slechts 0,13 l/100km (1,3 kWh per 100 km) nodig bij 24 km/h. Met een gewicht van 50 kg en minder hoog dan een verkeerskegel, biedt hij comfortabel plaats aan een tienerbestuurder.

Hmmm. Ik denk dat de bestuurder van het 'monster' in **Fig.20.1** een verandering in "look and feel" en prestaties zou opmerken als we hem in een eco-auto zouden zetten en hem zouden opdragen zijn snelheid te beperken tot maximaal 24 km/h. Als zodanig is het een sprookje dat auto's gemakkelijk 100 keer energie-efficiënter kunnen worden.

[136] Wij zullen zo dadelijk terugkomen op de uitdaging om energie-efficiënte auto's te bouwen. Maar laat ik eerst eens kijken naar andere benaderingen die voldoen aan de beginselen van een efficiënter vervoer over land.

Fig.20.3 toont een meerpersoonsvoertuig dat minstens 25 keer efficiënter is dan de standaardauto: de fiets. De prestaties van de fiets (in energie per afstand) zijn ongeveer gelijk aan die van de eco-auto. De snelheid is hetzelfde, de massa is lager (omdat de mens de tank en de motor vervangt), en de effectieve voetafdruk is groter omdat de fietser niet zo gestroomlijnd is als de eco-auto.

Fig.20.4 toont een ander mogelijk substituuat voor de benzine-auto: een trein waarvan de energiekosten, bij volledige bezetting, 1,6 kWh per 100 passagiers-km bedragen. Anders dan eco-auto's en fietsers, bereiken treinen hun uitstekende efficiën-



Fig.20.3: "Baby aan boord" Deze wijze van vervoer heeft een energiekost van 1 kWh per 100 persoon-km.



Fig.20.4: Deze trein met 8 wagons verbruikt 1,6 kWh per 100 passagierskilometer wanneer hij vol is bij zijn topsnelheid van 161 km/u.

tie niet door een lage snelheid en niet door een laag voertuiggewicht per persoon. Treinen compenseren hun hoge snelheid en hun hoge gewicht door het principe van een kleine voetafdruk per persoon toe te passen. Waar een fietser of een standaard-auto een voetafdruk hebben van respectievelijk $0,8 \text{ m}^2$ en $0,5 \text{ m}^2$ per persoon, brengt een overvolle forensentrein van Cambridge naar Londen dit terug tot $0,02 \text{ m}^2$ per persoon.

Maar, oh jee, nu hebben we een akelig onderwerp aangesneden - het vooruitzicht om een voertuig te delen met "al die vreselijke mensen". Maar het verleden is verleden tijd en laten we ons afvragen: hoeveel zou het verbruik kunnen worden teruggedrongen door over te schakelen van particuliere benzineslurpers op uitstekend geïntegreerd openbaar vervoer?

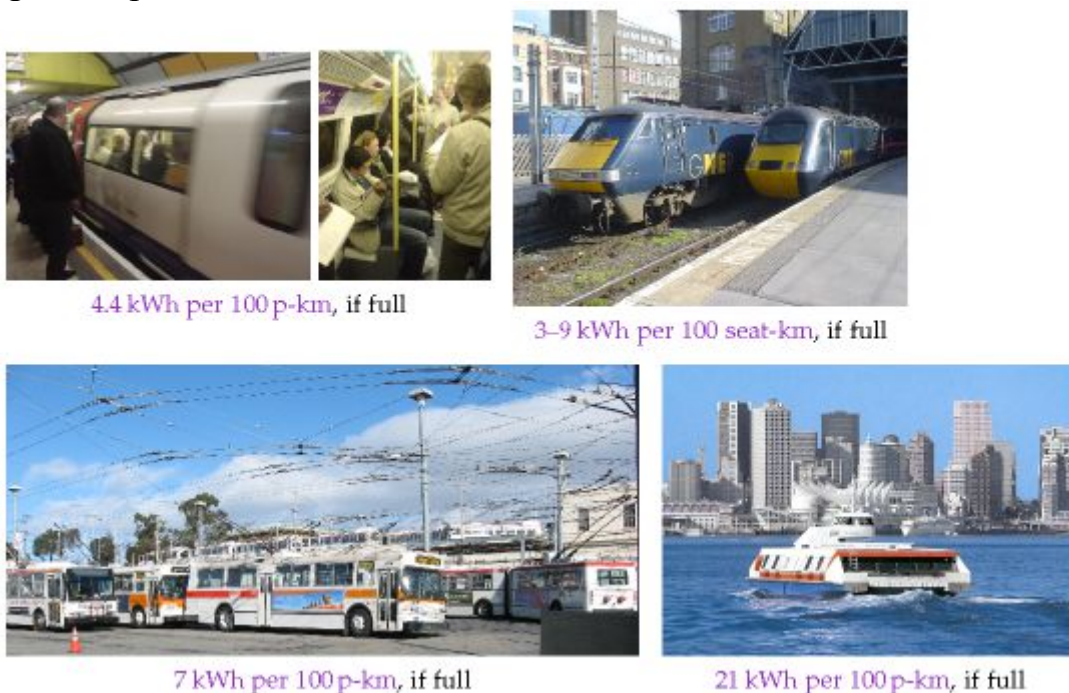


Fig.20.5: Enkele vormen van openbaar vervoer en hun energie-efficiëntie, op zijn best. Metro's, van buiten en van binnen. Twee hogesnelheidstreinen. De elektrische heeft 3 kWh per 100 zit-km nodig, de diesel 9 kWh. Trolley bussen in San Francisco. Vancouver SeaBus. Foto door Latty.

Openbaar vervoer

In het beste geval is openbaar vervoer veel energie-efficiënter dan particulier vervoer. Een **dieselbussenbus** die 49 passagiers vervoert bij 100 km/u met 28 l/100 km verbruikt 6 kWh per 100 p-km - 13 keer beter dan een personenauto.

De **trolleybussen** van Vancouver hebben 270 kWh per 100 voertuig-km nodig bij een gemiddelde snelheid van 15 km/h. Als zo'n bus 40 passagiers aan boord heeft, kost het 7 kWh per 100 p-km om ermee te rijden. De **SeaBus** van Vancouver heeft 83 kWh per voertuig-km nodig bij 13,5 km/u. Hij kan 400 mensen vervoeren, dus kost het 21 kWh per 100 p-km om passagiers te vervoeren bij volledige bezetting.

[137] De treinen van de Londense **metro** rijden op 4,4 kWh per 100 p-km tijdens piekuren - 18 keer beter dan individuele auto's. **Hogesnelheidstreinen**, die twee principes met voeten treden door twee keer zo snel te gaan als een auto en veel te wegen, zijn ook veel efficiënter: Wanneer een elektrisch aangedreven hogesnelheidstrein vol is, bedragen de energiekosten 3 kWh per 100 p-km - 27 keer minder dan auto's.

Maar we moeten realistisch blijven in onze planning. Sommige treinen of bussen zijn niet vol (fig.20.6). Het gemiddelde energieverbruik van het openbaar vervoer is dan ook groter dan in het bovenvermelde bestcasescenario. Wat zijn de gemiddelde energiekosten van openbaarvervoersystemen en wat is een realistische schatting van hoe goed ze zouden kunnen zijn?



Fig.20.7: (Boven) Enkele vormen van openbaar vervoer en hun gemiddeld energieverbruik. Links: Rode bussen, rechts: Croydon Tramlijn. Foto door Stephen Parascandolo

Fig.20.6: (rechts) Sommige treinen zijn niet vol. Drie mannen en een cello - de enige passagiers in dit rijtuig van de hogesnelheidstrein van 10.30 uur van Edinburgh naar Kings Cross.



Energieverbruik (kWh per 100 p-km)	
Auto	68
Bus	19
Rail	6
Air	51
Schip	57

Tabel.20.8: (links) Totale vervoersefficiëntie per vervoerswijze in Japan (1999)

In 2006-7 bedroegen de totale energiekosten van de Londense metro, inclusief verlichting, liften, remises en onderhoud, 15 kWh per 100p-km - vijf keer beter dan onze vergelijkingsauto. De energiekosten van de Londense bussen bedroegen in dezelfde periode 32 kWh per 100p-km. Natuurlijk zijn de energiekosten niet de enige doorslaggevende factor. Passagiers hechten waarde aan snelheid: en metro's halen hogere snelheden (gemiddeld 33 km/u) dan bussen (18 km/u). De beheerders hou-

den de financiële kosten in het oog: de personeelskosten per reizigerskilometer zijn lager voor metro's dan voor bussen.

Het totale energieverbruik (inclusief remise- en halteactiviteiten) van het Croydon Tramlink systeem (**Fig.20.7**) in 2006-7 was 9 kWh per 100 pkm, bij een gemiddelde snelheid van 25 km/h.

Hoe goed kan het openbaar vervoer zijn? Misschien kunnen wij een ruwe indicatie krijgen uit de gegevens voor Japan (**Tabel.20.8**). Bus met 19 kWh per 100 p-km en spoor met 6 kWh per 100 p-km lijken veelbelovend. Het spoor heeft het mooie voordeel dat het een oplossing biedt voor onze beide taken - vermindering van het energieverbruik en onafhankelijkheid van fossiele brandstoffen. Bussen hebben duidelijke voordelen wat eenvoud en flexibiliteit betreft. Maar die flexibiliteit krijgen als je bussen onafhankelijk van fossiele brandstoffen wilt maken, dat kan een uitdaging zijn.

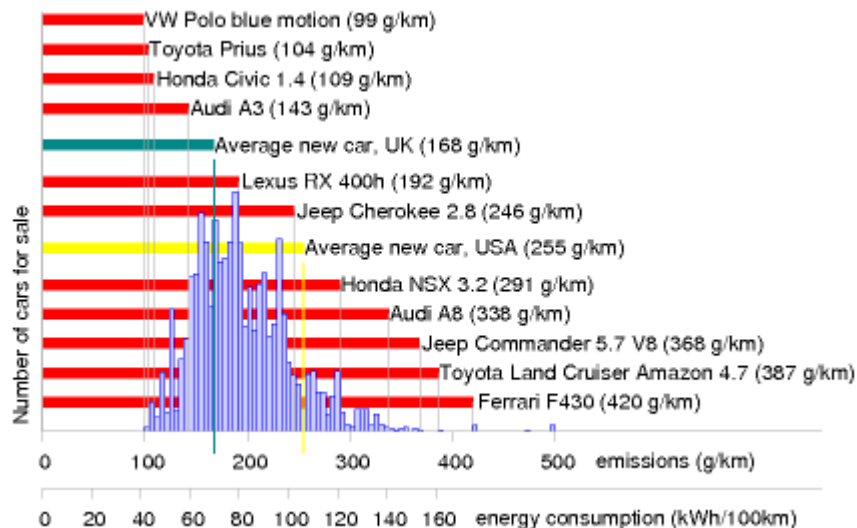


Fig.20.9: CO₂-uitstoot, in g per km, van geselecteerde in Engeland verkochte auto's. Op de horizontale as staat het emissiepercentage en de hoogte van het blauwe histogram geeft de verkoop in 2006 aan voor het desbetreffende model. Bron: www-new-carnet.co.uk. De tweede horizontale as geeft bij benadering het energieverbruik aan, ervan uitgaande dat 240 g CO₂ overeenkomt met ongeveer 1 kWh chemische energie.

138] Samenvattend lijkt openbaar vervoer (vooral elektrische treinen, trams en bussen) een veelbelovende manier om mensen te vervoeren - beter in termen van energie per passagierskilometer, misschien wel 5 of 10 keer beter dan auto's. Maar als mensen aandringen op de flexibiliteit van het privé-voertuig, wat zijn dan onze andere opties?

Particuliere voertuigen: technologie, regelgeving en stimulansen

Het energieverbruik in het particulier vervoer kan worden teruggedrongen. Dat blijkt wel uit de grote verscheidenheid aan energie-efficiëntie van de aangeboden auto's. In dezelfde showroom kon men in 2006 een Honda Civic 1.4 zien staan, die ongeveer 44 kWh per 100 km verbruikt, of een Honda NSX 3.2, die 116 kWh per 100 km verbruikt (**Fig.20.9**).



Fig.20.10: Speciale parkeerprivileges voor elektrische auto's in Ann Arbor, Michigan



Fig.20.11: Monsterauto's zijn groot genoeg om het zicht en de zichtbaarheid van voetgangers volledig te belemmeren.

Het feit dat mensen zonder blikken of blozen uit dit brede gamma kopen, bewijst dat we extra stimulansen en wetgeving nodig hebben om de gewaardeerde consument ertoe aan te zetten voor energiezuinigere auto's te kiezen. Er zijn verschillende manieren om de consument te helpen de Honda Civic te verkiezen boven de benzineslurpende NSX 3.2: Verhoging van de brandstofprijzen; verhoging van de belasting op nieuwe auto's in verhouding tot het verwachte levensduurverbruik van de auto; verhoging van de wegenbelasting voor benzineverspillers; parkeerprivileges voor zuinige auto's (**fig.20.10**); of brandstofrantsoenering. Al deze maatregelen zijn impopulair bij ten minste enkele kiezers.

[139] Misschien zou een betere wetgevingstactiek erin bestaan een verstandige energie-efficiëntie af te dwingen, in plaats van de vrije keuze te blijven toestaan; bijvoorbeeld, vanaf een bepaalde datum zouden we eenvoudigweg de verkoop kunnen verbieden van een auto met een energieverbruik van meer dan 80 kWh per 100 km; en dan mettertijd die limiet verlagen tot 60 kWh per 100 km, dan verder tot 40 kWh per 100 km, en verder. Om de consument meer keuze te geven, kunnen autofabrikanten er door regelgeving ook toe worden verplicht het gemiddelde energieverbruik van al hun verkochte auto's te verlagen. Aanvullende wetgeving ter beperking van het gewicht en de voetafdruk van voertuigen zou tegelijkertijd het brandstofverbruik verminderen en de veiligheid van andere weggebruikers vergroten (zie **fig.20.11**). Mensen maken tegenwoordig modestements met hun autokeuze. Met een strikte efficiëntiewetgeving zou er nog steeds een ruime keuze op basis van mode kunnen zijn, behalve dat alle varianten toevallig ook energie-efficiënt zouden zijn. Je kon elke kleur kiezen, als het maar groen was.

Zolang we nog steeds wachten op kiezers en politici om het eens te worden over zuinige auto's, welke andere opties hebben we dan nog



Fig.20.12: Een rotonde in Enschede, Nederland



Fig.20.13: Enkele Nederlandse fietsen

Fietsen

Mijn favoriete suggestie is het aanleggen van uitstekende fietspaden, geflankeerd door passende wetgeving (lagere snelheidslimieten of ongevalenregelingen die gunstig zijn voor fietsers, bijvoorbeeld). **Fig.20.12** toont een rotonde in Enschede, Nederland. Het bestaat uit twee cirkels, één voor auto's is binnen de andere voor fietsers, gescheiden door een goede autolengte.



Fig.20.14: Ondertussen, terug in Engeland. Foto rechts door Mike Armstrong



De voorrangsregels zijn dezelfde als in Engeland, maar auto's moeten bij het verlaten van de binnenste cirkel voorrang verlenen aan fietsers die om hen heen rijden (in tegenstelling tot voetgangers bij een zebrapad). Waar uitstekende fietspaden zijn, zullen mensen ze gebruiken, zoals blijkt uit de massa's fietsen buiten het station van Enschede (**fig.20.13**).

Op de een of andere manier halen de Engelse fietspaden echter niet helemaal de Nederlandse standaard (**fig.20.14**).

In de Franse stad Lyon is een particuliere fietsverhuurdienst, Vélo'v, populair geworden, opgericht in 2005. Voor de 470.000 inwoners van Lyon zijn 2000 fietsen

beschikbaar in ongeveer 175 stations binnen een stadsgebied van 50 km² (fig.20.15). In het centrum van de stad is men meestal nooit meer dan 400 m van een fietsstation verwijderd. Gebruikers kunnen zich inschrijven voor 10€ per jaar en kunnen dan gratis fietsen huren voor alle ritten onder de 30 minuten. Voor langere ritten moet je extra betalen tot 1€ per uur. Bezoekers kunnen zich voor een week inschrijven voor 1 euro.

[140] Andere wetgevende opties

Snelheidslimieten zijn een eenvoudige knop om in te drukken. In het algemeen verbruiken auto's die langzamer rijden minder energie (aanhangel A). Met oefening kunnen bestuurders leren zuiniger te rijden: Minder optrekken en afremmen en altijd in een zo hoog mogelijke versnelling rijden kan het brandstofverbruik met 20% doen dalen.



Fig.20.16: In een file als deze gaat lopen nog sneller

Een andere manier om het verbruik te verminderen is het vermijden

van files. Stop-and-go verkeer, optrekken en weer afremmen, is een veel minder efficiënte manier van rijden dan rustig doorrollen. In de file staan met draaiende motor is een bijzonder inefficiënte manier van brandstofverbruik.

Verkeersopstoppen ontstaan wanneer er te veel auto's op de weg zijn. Dus het groeperen van reizigers in minder auto's is een makkelijke manier om congestie te vermijden. Een overtuigend argument om over te schakelen van auto's op bussen is de berekening van de voor beide vervoerswijzen benodigde ruimte op de weg.



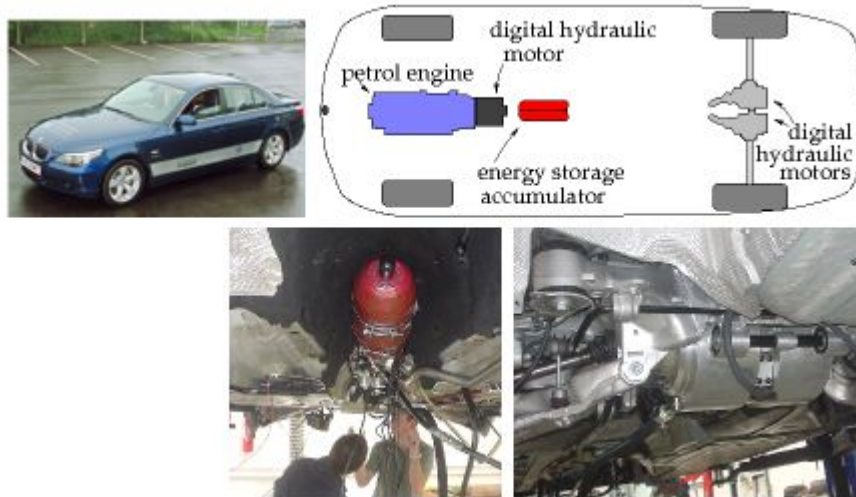
Fig.20.15: Een Vélu'v-station in Lyon

Laten we een hoofdweg nemen net voor een file ontstaat, met een richtsnelheid van 100 km/u. De veiligheidsafstand tussen voertuigen bedraagt 77 m. Laten we aannemen dat er elke 80 m een auto staat, elk bezet door 1,6 personen. Om 40 mensen in één bus te proppen zou dan 2 km weg leeg zijn!

141] Congestie kan worden verminderd door goede alternatieven te bieden (fietspaden, openbaar vervoer), en door weggebruikers te laten betalen wanneer zij bijdragen aan congestie. In de noten aan het eind van dit hoofdstuk beschrijf ik een eerlijke en eenvoudige methode voor congestieheffingen.

De verbetering van auto's

Ervan uitgaande dat de oude liefdesrelatie van de wereld met auto's niet kan worden doorbroken, welke technologieën kunnen dan aanzienlijke energiebesparingen opleveren? Besparingen van 10% of 20% zijn gemakkelijk - we hebben al enkele manieren besproken om dit te bereiken, zoals auto's kleiner en lichter maken.



Afb.20.17: Een BMW 520i omgebouwd van Artemis Intelligent Power naar digitale hydraulica. Onderaan links: Een opslagtank van 6 liter (rode bus) kan ongeveer 0,05 kWh aan energie opslaan in gecompriëerde stikstof. Onderaan rechts: Twee 200 kW hydraulische motoren, één voor elk achterwiel, die de auto aandrijven en afremmen. De auto wordt nog steeds aangedreven door zijn 190 kW benzinemotor, maar dankzij de digitale hydraulica en het regeneratieve remmen verbruikt hij 30% minder brandstof.

Een andere optie is over te schakelen van benzine op diesel. Dieselmotoren zijn duurder om te bouwen, maar ze zijn meestal zuiniger. Maar zijn er technologieën die de efficiëntie van de energieketen echt radicaal kunnen verbeteren? (Vergeet niet dat in de standaardauto 75% van de energie als warmte via de radiator de lucht in wordt geblazen!) En hoe zit het met de opdracht om van fossiele brandstoffen af te komen? In dit deel bekijken we vijf technologieën: Regeneratief remmen; hybride auto's; elektrische auto's; auto's op waterstof; en persluchtaandrijving.

Regeneratief remmen

Er zijn vier manieren om energie op te vangen wanneer een voertuig wordt afgeremd:

1. een aan de wielen gekoppelde elektrische generator kan een batterij of supercondensator opladen.
2. Door de wielen aangedreven hydraulische pompen kunnen samengeperste lucht produceren die in kleine bussen wordt opgeslagen.
3. energie kan worden opgeslagen in een vliegwiel

4. remenergie kan worden opgeslagen als gravitatie-energie door het voertuig een helling op te rijden wanneer je het wilt afremmen. Deze gravitatie-opslagmogelijkheid is vrij inflexibel omdat een helling altijd op de juiste plaats moet klaarstaan. Deze optie is vooral interessant voor treinen, zoals bijvoorbeeld blijkt uit de Victoria-lijn van de Londense metro, die bulten heeft voor de stations. Elke halte bevindt zich op een heuvel langs de lijn. Aankomende treinen worden automatisch vertraagd door de heuvel, en vertrekkende treinen worden versneld naarmate zij de helling van de heuvel afrijden. Dit spoorontwerp levert 5% energiebesparing op en maakt de treinen 9% sneller.

[142] Elektrisch regeneratief remmen (met behulp van een batterij om energie op te slaan) bespaart ongeveer 50% van de kinetische energie in een remgebeurtenis, wat resulteert in misschien 20% energiebesparing in stadsverkeer.



Fig.20.18: (Links) Een regeneratief remsysteem met vliegwiel. Foto's met dank aan Flybrid Systems



Fig.20.19: (boven) Toyota Prius - volgens Jeremy Clarkson "een zeer dure, zeer gecompliceerde, niet bepaald groene, trage, goedkoop gemaakte en onnozele manier om je te verplaatsen"

Regeneratieve remsystemen die gebruik maken van vliegwielen of hydraulica lijken iets beter te presteren dan op batterijen gebaseerde systemen, waarbij ongeveer 70% van de remenergie wordt bespaard. **Fig.20.17** beschrijft een hybride auto met een benzinemotor die digitaal geregelde hydraulica aandrijft. In de standaard rijcyclus verbruikt deze auto 30% minder brandstof dan de originele benzinemotor. In de stad wordt het energieverbruik gehalveerd van **131 kWh per 100 km** tot **62 kWh per 100 km**. (De helft van dit succes is te danken aan regeneratief remmen en de andere helft aan hybride technologie). Hydraulica en vliegwielen zijn beide veelbelovende benaderingen van regeneratief remmen, aangezien zij kleine eenheden in staat stellen grote hoeveelheden energie te verwerken. Een vliegwielsysteem van slechts 24 kg (**Fig.20.18**), ontworpen voor een raceauto, kan 400 kJ (0,1 kWh) opslaan - genoeg energie om een normale auto te versnellen tot ongeveer 100 km/u (62 mph); en het kan 60 kW vermogen opnemen of leveren. Batterijen in deze ver-

mogensklasse wegen ongeveer 200 kg. Als er dus nog geen accu's van dit type aan boord zijn, is het voor elektrisch regeneratieve remmen wellicht beter condensatoren te gebruiken om remenergie op te slaan. Supercondensatoren hebben soortgelijke energieopslag- en vermogensparameters als vliegwielen.

Hybride auto's

Hybride auto's zoals de Toyota Prius (**fig.20.19**) hebben efficiëntere motoren en regeneratieve remmen, maar om eerlijk te zijn steken ze er niet echt bovenuit (**fig.20.9**).

De horizontale balken in **Fig.20.9** tonen enkele auto's waaronder twee hybrides. Vergeleken met de gemiddelde nieuwe auto in Engeland die 168 g CO₂ per km uitstoot, stoot de hybride Prius 100 g CO₂ uit, evenals veel niet-hybride auto's - de VW Polo blue motion stoot 99 g/km uit, en er is een Smart met 88 g/km.

De Lexus RX 400h is de tweede hybride, aangeprezen met de slogan: "LOW POLLUTION, ZERO GUILT. Q25²⁵" Toch bedraagt zijn CO₂-uitstoot 192 g/km - slechter dan het Britse gemiddelde! De mededingingswaakhond oordeelde dat deze reclame in strijd was met de beginselen van waarheid, vergelijkbaarheid en milieuclaims. "Wij denken (...) dat de lezer hier moet worden wijsgemaakt dat deze auto geen of weinig schade aan het milieu zou toebrengen, wat niet het geval was, en dat deze auto weinig emissies zou hebben in vergelijking met andere auto's, wat ook niet het geval was."

[143] In de praktijk blijken hybride technologieën besparingen van 20% of 30% op te leveren. Daarom lijken noch de benzine/elektrische hybriden, noch de benzine/hydraulische hybriden van **fig.20.17** het vervoersprobleem echt te hebben opgelost. Een besparing van 30% op fossiele brandstoffen is indrukwekkend, maar niet genoeg op de schaal die wij in dit boek bekijken. Onze oorspronkelijke veronderstelling was immers dat wij van de fossiele brandstoffen zouden afstappen of deze met ten minste 90% zouden verminderen. Kunnen we dit doel bereiken zonder terug te vallen op de fiets?



Fig.20.20: Elektrische voertuigen. Van links naar rechts: de G-Wiz; de aftandse resten van een Sinclair C5; een Citroën Berlingo; een Elettrica3

25) Q25 Letterlijk: "Nauwelijks vervuiling, geen schuld".

Elektrische auto's

De elektrische auto REVA werd in juni 2001 in Bangalore geïntroduceerd en wordt naar het Verenigd Koninkrijk geëxporteerd onder het merk G-Wiz. De elektromotor heeft een piekvermogen van 13 kW en een continu vermogen van 4,8 kW. De motor ondersteunt regeneratief remmen. Hij wordt aangedreven door acht loodzuuraccu's van 6 volt die, volledig opgeladen, een actieradius van "maximaal 77 km" bieden. Voor één lading is 9,7 kWh elektriciteit nodig. Deze cijfers geven een transportkost van 13 kWh per 100 km.

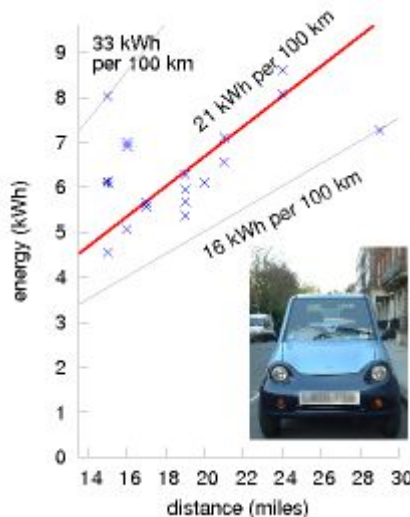


Fig.20.21: (links) elektriciteit nodig om een G-Wiz op te laden versus afgelegde afstand. Gemeten bij het stopcontact.

De beweringen van de fabrikanten hebben altijd betrekking op de best mogelijke prestaties van de producten. Maar wat gebeurt er in het echte leven? De prestaties in de praktijk van een G-Wiz in Londen zijn te zien in **fig.20.21**. In de loop van 19 laadcycli bedroeg de gemiddelde transportkost van deze G-Wiz 21 kWh per 100 km - ongeveer vier keer beter

dan de gemiddelde auto. Het beste resultaat was 16 kWh per 100 km, het slechtste 33 kWh per 100 km. [144] Of als je geïnteresseerd bent in CO₂-uitstoot, komt 21 kWh per 100 km overeen met 105 g CO₂ per km, ervan uitgaande dat elektriciteit een voetafdruk achterlaat van 500 g CO₂ per kWh.

Fig.20.22: (rechts) Tesla Roadster: 15 kWh per 100 km. www.teslamotors.com



Nou, de G-Wiz zit aan de ene kant van het prestatie-spectrum. Wat als we meer eisen - meer versnelling, meer snelheid, meer bereik? Aan de andere kant van het spectrum staat de Tesla Roadster. De Tesla Roadster uit 2008 heeft een actieradius van 345 km; zijn lithium-ionbatterij heeft een capaciteit van 53 kWh en weegt 450 kg (120 Wh/kg). Het voertuig weegt 1220 kg en het maximumvermogen van de motor is 185 kW. Wat is het energieverbruik van deze krachtpatser? Opmerkelijk is dat hij beter is dan de G-Wiz: **15 kWh per 100 km**. Een indicatie dat een actieradius van 345 km voor de meeste mensen en in de meeste gevallen voldoende zou moeten zijn, is het feit dat slechts 8,3% van de forrenzen meer dan 30 km naar hun werk rijden.

Ik heb de prestatiecijfers van een heleboel elektrische auto's opgezocht - ze staan in

de noten aan het eind van het hoofdstuk - en ze lijken overeen te komen met de volgende samenvatting: Elektrische auto's kunnen vervoer leveren voor ongeveer 15 kWh per 100 km. Dat is vijf keer beter dan onze fossiele brandstof vergelijkingsauto, en aanzienlijk beter dan welke hybride auto dan ook. Hoera! Om tot zuinig vervoer te komen, hoeven we ons niet in het openbaar vervoer te proppen - we kunnen blijven rondracen en genieten van de geneugten en vrijheden van individueel autorijden, dankzij elektrische auto's.

Dit feestelijke moment is een goed moment om de grote samenvattende grafiek van dit hoofdstuk te onthullen, **Fig.20.23**, waarin de energiebehoeften van het personenvervoer voor alle door ons behandelde vormen en voor sommige nog te behandelen vormen zijn aangegeven.

Fig.20.23: (volgende blz.) Energieverbruik van verschillende vormen van personenvervoer. De verticale coördinaat geeft het energieverbruik in kWh per 100p-km aan. De horizontale coördinaat geeft de snelheid van het transport aan. De gemiddelde Engelse auto met één inzittende "Car(1)" verbruikt 33 mpg (8,5 l/100km). "Bus" is het prestatiegemiddelde van alle Londense bussen. "Underground System" staat voor het gemiddelde van het Londense ondergrondse netwerk. "Catamaran" is een boot die door een dieselmotor wordt aangedreven. Links staan nog de brandstofefficiënties in mijlen per (UK) gallon per passagier (p-mpg) ter vergelijking. Holle puntmarkeringen geven de prestaties onder optimale praktijkomstandigheden weer, ervan uitgaande dat alle zitplaatsen bezet zijn. De gevulde punten geven de werkelijke prestaties onder normale omstandigheden weer. Zie ook fig.15.8 (Energieverbruik voor vrachtvervoer).

OK, de race is begonnen en ik heb twee winnaars bekend gemaakt - openbaar vervoer en elektrische auto's. Maar zijn er nog andere opties over de eindstreep gekomen? We moeten nog kijken naar met perslucht aangedreven auto's en waterstofaandrijvingstechnologie. Maar als een van deze concepten beter blijkt te zijn dan elektrische auto's, zal dat het beeld op lange termijn niet fundamenteel veranderen: Welke van deze drie technologieën we ook realiseren, de voertuigen zouden oplaadbaar zijn via energie uit een "groene" bron.



Fig.20.24: (rechts) Een persluchttram in Nantes zuigt lucht en stoom aan. De exploitatie van de trams in Nantes vergde 4,4 kg steenkool (36 kWh) per voertuig-km, of 115 kWh per 100p-km wanneer de tram vol was. [5qhvcb] (onder) Een persluchtlocomotief, gewicht 9,2t, druk 175 bar, vermogen 26 kW. Foto met dank aan Rüdiger Fach, Rolf-Dieter Reichert en het Feldbahnmuseum Frankfurt.



Gecomprimeerde lucht aandrijving

Door de lucht aangedreven voertuigen zijn geen nieuw idee. Honderden trams aangedreven door perslucht en warm water bevolkten de straten van Nantes en Parijs van 1879 tot 1911. **Fig.20.24** toont een Duitse pneumatische locomotief uit 1958. Ik denk dat, in termen van energie-efficiëntie, persluchttechnologie niet zo geschikt is voor energieopslag als elektrische batterijen. Het probleem is dat bij het samenspellen van lucht warmte vrijkomt die waarschijnlijk niet efficiënt kan worden gebruikt, en dat bij het uitzetten van lucht koeling nodig is, die waarschijnlijk ook niet efficiënt kan worden gebruikt. [146] In andere opzichten is perslucht weer superieur aan batterijen. Lucht kan bijvoorbeeld duizenden keren worden samengeperst zonder te worden opgebruikt! Interessant weetje: het eerste product dat Aircar verkocht was een elektrische scooter. [www-theaircar-com/acf] [404]

Er zijn geruchten dat Tata Motors in India luchtaangedreven auto's aan het maken is, maar het is moeilijk te zeggen of er een comeback van persluchtaangedreven voertuigen komt, omdat niemand specificaties van huidige prototypes vrijgeeft. Hier ligt de fundamentele beperking: de energiedichtheid van persluchttopslag is slechts ongeveer 11-28 Wh/kg, wat ruwweg overeenkomt met lood-zuur batterijen. (Zie ook **Fig.26.13** voor details over andere opslagtechnologieën) De actieradius van een persluchtauto zal dus nooit beter zijn dan die van de eerste elektrische auto's. Persluchttopslagsystemen hebben drie voordelen ten opzichte van accu's: Langere levensduur, goedkoper te produceren, en minder vervelende chemicaliën.

Waterstof aangedreven auto's - zoals met de Zeppelin

Ik denk dat waterstof gewoon een mediahype is met een hoop volgelingen. Ik ben blij dat mijn ongelijk bewezen wordt, maar ik zie niet in hoe waterstof ons kan helpen onze energieproblemen op te lossen. Waterstof is geen wonderbaarlijke energiebron, het is gewoon een energiedrager, zoals een oplaadbare batterij. En het is een zeer inefficiënte energiedrager met een heleboel praktische beperkingen.



Fig.20.25: De Hummer H2H: De groene revolutie op z'n Amerikaans. Foto met dank aan General Motors



Fig.20.26: De BMW Hydrogen 7. Energieverbruik: 254 kWh per 100 km. Foto door BMW.

De "waterstofeconomie" kreeg bijval van het tijdschrift *Nature* in een artikel waarin

de gouverneur van Californië, Arnold Schwarzenegger, werd geprezen terwijl hij een op waterstof rijdende Hummer voltankt (**fig.20.25**). Het *Nature*-artikel prees Arnolds visie van waterstofauto's ter vervanging van "vervuilende modellen", en merkte op: "De gouverneur is een echte klimaatheld". Maar de kritische vraag die absoluut gesteld moet worden bij een dergelijk waterstofheldendom is: "Waar komt de energie vandaan om de waterstof te maken?" Bovendien kan de omzetting van energie in en uit waterstof slechts op inefficiënte wijze gebeuren - althans met de huidige technologie.

Hier zijn wat cijfers:

- In het CUTE-project (*Clean Urban Transport for Europe*), dat tot doel had de haalbaarheid en betrouwbaarheid van brandstofcelbussen en waterstof-technologie aan te tonen, [147] kostte het tanken van de waterstofbussen tussen 80% en 200% meer energie dan voor het vergelijkingsvoertuig, een dieselbus.
- Voor het tanken van de Hydrogen 7, BMW's waterstofauto, is 254 kWh per 100 km nodig - 220% meer energie dan voor de gemiddelde Europese auto.

Als onze opdracht was "Stop alstublieft het gebruik van fossiele brandstoffen in het vervoer, zelfs in de veronderstelling dat een onbeperkte hoeveelheid groene energie gratis beschikbaar is", dan zou natuurlijk een energieverpillende oplossing als waterstof al het overwegen waard zijn (hoewel waterstof andere problemen heeft). Maar groene stroom is niet gratis. In feite is het opwekken van groene stroom op de schaal van ons huidige verbruik al een echte uitdaging. Het probleem van de fossiele brandstoffen is een energieprobleem. Het probleem van de klimaatverandering is een energieprobleem. We moeten ons richten op oplossingen die minder energie verbruiken, niet op "oplossingen" die meer verbruiken. Ik ken geen enkele vorm van vervoer over land waarvan de energie-voetafdruk slechter is dan die van de waterstofauto. (De enige slechtere vormen van vervoer zijn jetski's - met ongeveer 500 kWh per 100 km - en een door biodiesel aangedreven speedboot genaamd Earthrace, absurd genoeg een eco-boot genoemd, die 800 kWh per 100 p-km verbruikt).



Fig.20.27: De Earthrace "eco-boot". Foto door David Castor



Afb.20.28: Honda FCX Clarity sedan met waterstofbrandstofcel, met Jamie Lee Curtis ter vergelijking op schaal. Foto met dank aan automobiles.honda.com.

Voorstanders van waterstof zeggen dat "de BMW Hydrogen 7 nog maar een vroeg prototype is, het is een luxe auto, een krachtpatser - de technologie zal nog efficiënter worden." Ja, ik hoop het, want het heeft nog heel wat in te halen. De Tesla Roadster (**fig.20.22**) is ook een vroeg prototype, een luxe auto, een krachtpatser. En het is meer dan tien keer energie-efficiënter dan de Hydrogen 7! U mag gerust uw geld op het waterstofpaard zetten als u wilt, en als het uiteindelijk wint, geweldig! Maar het lijkt niet veelbelovend om een paard te bevoordelen dat al zo ver achter ligt in de race. Kijk naar **fig.20.23** - als ik de bovenkant van de verticale as niet had samengedrukt, zou de waterstofauto helemaal niet op de pagina hebben gepast!

Toegegeven, de brandstofcelauto van Honda, de FCX Clarity, doet het beter - hij rijdt op 69 kWh per 100 km - maar mijn voorspelling is dat wanneer de "ZeroEmission"-ophef afneemt, we zullen beseffen dat waterstofauto's evenveel energie verbruiken als onze gemiddelde benzineauto's vandaag doen.

Hier zijn nog wat andere problemen met waterstof. Waterstof is minder geschikt als energieopslag dan de meeste vloeibare brandstoffen, vanwege zijn volume, hetzij als sterk gecomprimeerd gas, hetzij als vloeistof (waarvoor een temperatuur van minder dan $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ vereist is). Zelfs bij een druk van 700 bar (waarvoor een stabiel drukvat nodig is) bedraagt de energiedichtheid (energie per volume-eenheid) slechts 22% van die van benzine. De cryogene tank van de BMW Hydrogen 7 weegt 120 kg en kan 8 kg waterstof bevatten. Bovendien lekt er geleidelijk waterstof uit vrijwel elke tank.

148] Als u uw waterstofauto bij het station parkeert en een week later terugkomt, wees er dan op voorbereid dat het grootste deel van de waterstof verdampt is.

Enkele vragen over elektrische voertuigen

Wij hebben aangetoond dat elektrische auto's energie-efficiënter zijn dan auto's die op fossiele brandstoffen rijden. Maar zijn ze ook beter voor het vermijden van CO_2 als de elektriciteit nog steeds wordt opgewekt door elektriciteitscentrales die fossiele brandstoffen gebruiken?

Het is een eenvoudige berekening. Laten we aannemen dat elektrische auto's 20 kWh(el) per 100 km verbruiken. (Ik denk dat 15 kWh(el) per 100 km perfect haalbaar is, maar laten we in deze berekening aan de sceptische kant blijven). Als de elektriciteit van het net een CO_2 -voetafdruk achterlaat van 500 g per kWh(el), dan is de effectieve CO_2 -uitstoot van deze auto 100 g CO_2 per km, wat vergelijkbaar is met de betere auto's op fossiele brandstoffen (**fig.20.9**). Ik concludeer dat overschakelen op elektrische auto's nu al een goed idee is, nog voordat we onze elektriciteitsvoorziening hebben omgeschakeld op groene energie.

Elektrische auto's hebben, net als benzineauto's, kosten, zowel voor de productie als voor het gebruik. Elektrische auto's mogen dan minder kosten, maar als de accu's niet erg lang meegaan, moet er dan niet meer aandacht worden besteed aan de productiekosten?

Ja, dat is een goed punt. De transportgrafiek toont alleen de exploitatiekosten. Als elektrische auto's om de paar jaar nieuwe batterijen nodig hebben, zijn mijn cijfers waarschijnlijk een onderschatting. De batterijen in de Prius worden verondersteld 10 jaar mee te gaan en kosten 3.500 euro om te vervangen. Zal iemand een 10 jaar oude Prius willen en die kosten dragen? Men zou kunnen voorspellen dat de meeste Priussen na 10 jaar naar de schroothoop zullen gaan. Dat is zeker een voorbehoud dat geldt voor alle elektrische auto's met batterijen. Maar ik ben optimistisch dat de batterijtechnologie zal verbeteren naarmate we overgaan op elektrische voertuigen.

Ik woon in een heet gebied. Hoe zou ik in een elektrische auto kunnen rijden? Ik heb een krachtige airconditioner nodig!

Er is een elegant antwoord op dit bezwaar: monteer 4 m² fotovoltaïsche panelen in de naar de hemel gerichte oppervlakken van de auto. Als de airconditioner nodig is, schijnt de zon zeker. Modules met 20% rendement genereren tot 800W, wat genoeg is om de airconditioner te laten werken. De modules kunnen ook worden gebruikt om de auto op te laden wanneer hij geparkeerd staat. Autokoeling op zonne-energie was al in 1993 verkrijgbaar bij Mazda, de zonnecellen waren geïntegreerd in het glazen zonnedak.

Ik woon in een koud gebied. Hoe zou ik in een elektrische auto kunnen rijden? Ik heb een krachtige binnenverwarming nodig!

De motor van een elektrisch voertuig verbruikt gemiddeld ongeveer 10 kW met een rendement van 90-90%. Een deel van het verloren vermogen, de andere 5-10%, wordt als warmte in de motor verdeeld. Misschien kunnen elektrische auto's voor koude klimaten zo worden ontworpen dat de afvalwarmte van de motor, die zo'n 250 of 500 W kan bedragen, van de motor naar het interieur kan worden geleid. Zo veel vermogen kan de ramen ijsvrij maken of de bestuurder verwarmen.

[149] *Zijn lithium-ion batterijen veilig bij een ongeluk?*

Sommige lithium-ionbatterijen zijn onveilig bij kortsluiting of oververhitting, maar batterijfabrikanten produceren reeds veiliger batterijen op basis van bijvoorbeeld lithiumfosfaat. Er is een grappige video over dit op www.valece.com (404)

Is er genoeg lithium voor alle accu's in een groot wagenpark van elektrische auto's?

De wereldreserves aan lithium in ertsmijnen worden geraamd op 9,5 miljoen ton (blz. 196). Een lithium-ion batterij bestaat voor 3% uit lithium. In de veronderstelling dat elk voertuig een batterij van 200 kg heeft, zou dat neerkomen op 6 g lithium per voertuig. De lithiumreserves zouden dus voldoende zijn om batterijen te maken voor 1,6 miljard voertuigen. Dat is meer dan het aantal auto's in de wereld (ongeveer 1 miljard) - maar niet veel meer, dus de hoeveelheid lithium kan er al toe doen, vooral als we bedenken dat er tegenstrijdige ambities zijn van kernfusiereactortechnologie ([hoofdstuk 24](#)) om lithium te gebruiken in hun reactoren. Er zit echter vele duizenden malen meer lithium in zeewater, zodat de oceanen misschien een nuttige extra bijdrage zullen leveren. Lithiumspecialist R. Keith Evans zegt: "Zorgen over de beschikbaarheid van lithium voor batterijen voor hybride of elektrische auto's of andere te voorziene toepassingen zijn ongegrond." Bovendien worden andere lithiumvrije batterijtechnologieën onderzocht, zoals zink-luchtbatterijen [[www-revolttechnology-com \(404\)](#)]. Ik denk dat de elektrische auto werkt!

De toekomst van het vliegen?

De A380 superjumbo wordt een "zeer brandstofefficiënt vliegtuig" genoemd. In feite verbruikt het 12% minder brandstof per passagier dan een 747.

Boeing kondigde een soortgelijke doorbraak aan: hun nieuwe 747-8 Intercontinental, geroemd om zijn planeetbesparende kwaliteiten, is ook (volgens Boeing) slechts 15% zuiniger dan een 747-400.



Fig.20.29: (links) Airbus A380.



Fig.20.30: (boven) TSS Rijndam.

Dit trage tempo van de vooruitgang (in vergelijking met auto's, waar technologische veranderingen een twee- of zelfs tienvoudige verbetering van de efficiëntie opleveren) wordt uitvoerig beschreven in bijlage C. Vliegtuigen naderen hun fundamentele limiet, opgelegd door de wet van de fysica. Elk vliegtuig, ongeacht zijn grootte, moet noodzakelijkerwijs een energie van ongeveer 0,4 kWh per ton per km verbruiken om in de lucht te blijven en in beweging te blijven. Vliegtuigen zijn al fantastisch geoptimaliseerd en er is geen vooruitzicht op verdere verbeteringen van

hun efficiëntie.

Een tijd lang heb ik gedacht dat een levensvatbare manier om het probleem van het lange-afstandsvervoer op te lossen de terugkeer was naar de toestand van vóór het vliegtuig, naar de zeeschepen. Toen keek ik naar de cijfers. De trieste waarheid is dat oceaanschepen meer energie per passagier verbruiken dan Jumbo's. De QE2 gebruikt vier keer zoveel energie per passagier als een jumbo. OK, dat is een luxe schip, kunnen we dat verbeteren met tragere toeristen schepen? Een economische manier om de Atlantische Oceaan over te steken waren van 1952 tot 1968 de "Economy Twins", twee Nederlandse lijnschepen, de Maasdam en de Rijndam. Ze legden een snelheid van 16,5 knopen (30,5 km/u) af en de oversteek duurde 8 dagen. Hun energieverbruik, volledig beladen met 893 passagiers, bedroeg 103 kWh per 100p-km. Bij een typische beladingsgraad van 85% is dat 121 kWh per 100p-km - meer dan het dubbele van een jumbojet. Om eerlijk te zijn, schepen zorgen niet alleen voor vervoer: ze verwarmen ook de binnenlucht voor passagiers en bemanning, zorgen voor warm water, verlichting en entertainment voor een paar dagen; maar de energie die je thuis bespaart door een paar dagen aan boord te zijn, is minniem vergeleken met het energieverbruik van het schip, dat in het geval van de QE2 ongeveer 3000 kWh per dag per passagier bedraagt.

Helaas zullen schepen het waarschijnlijk nooit kunnen winnen van vliegtuigen op de lange afstand wat energieverbruik betreft. Als men echter lange-afstandsreizen onafhankelijk wil maken van fossiele brandstoffen, zijn door kernenergie aangedreven schepen misschien een interessante optie (**Fig.20.31 en 20.32**).



Afb.20.31: *NS Savannah, het eerste commerciële nucleair aangedreven vrachtschip tijdens een passage onder de Golden Gate Bridge in 1962.*



Afb.20.32: *De door kernenergie aangedreven ijsbreker Yamal met 100 toeristen aan boord naar de Noordpool, 2001. foto door Wofratz.*

Hoe zit het met vrachtvervoer?

De internationale scheepvaart is een verrassend efficiënte verbruiker van fossiele brandstoffen; het is dus veel belangrijker om in het wegvervoer van fossiele brandstoffen af te komen dan in de scheepvaart. Maar fossiele brandstoffen zijn een ein-

dige hulpbron, dus zelfs schepen zullen uiteindelijk door iets anders moeten worden aangedreven. Biobrandstoffen zouden daarvoor kunnen zorgen. Een andere optie is kernenergie. Het eerste door kernenergie aangedreven schip voor vracht- en passagiersvervoer was de NS Savannah (**afb.20.31**), die in 1962 te water werd gelaten als onderdeel van het "Atom for peace"-initiatief van president Dwight D. Eisenhower. Aangedreven door een 74 MW kernreactor en een 15 MW motor, bereikte de Savannah een kruissnelheid van 21 knopen (39 km/u) en kon 60 passagiers en 14.000 ton vracht vervoeren. Dit komt neer op een transportefficiëntie voor vracht van 0,14 kWh per t-km. Ze kan 500.000 km afleggen zonder bij te tanken. Momenteel zijn er veel door kernenergie aangedreven schepen, zowel militaire als civiele. Rusland heeft bijvoorbeeld tien door kernenergie aangedreven ijsbrekers, waarvan er zeven nog steeds actief zijn. **Fig.20.32** toont de nucleaire ijsbreker Yamal, die twee 171 MW reactoren en 55 MW motoren herbergt.

"Hé, je hebt het nog niet over magnetische levitatie gehad".

Het Duitse bedrijf Transrapid, dat de maglev-trein voor Shanghai, China, heeft gebouwd (fig.20.33), zegt: "



Hogesnelheidstreinen vergeleken bij 200 km/u

Transrapid	2,2 kWh per 100 zit-km
ICE	2,9 kWh per 100 zit-km

Fig.20.33: een magnetische levitatie trein op de luchthaven van Pudong, Shanghai.
"Rijden zonder wielen, vliegen zonder vleugels." Foto Door Alex Needharn.

Het Transrapid Superspeed magnetische levitatiesysteem is ongeëvenaard op het gebied van geluidsemissie, energieverbruik en landgebruik. Het innovatieve contactloze transportsysteem garandeert mobiliteit zonder dat het ten koste gaat van het milieu."

Magnetische levitatie is een van de vele benaderingen die veel aandacht krijgen wanneer over energievraagstukken wordt gesproken. Wat het energieverbruik betreft, is de vergelijking met andere hogesnelheidstreinen eigenlijk niet zo ernstig als de hype wil doen geloven. Op de Transrapid homepage wordt de Transrapid vergeleken met de ICE, een elektrische hogesnelheidstrein:

De belangrijkste redenen waarom magneettreinen iets beter zijn dan de ICE zijn: De magnetische aandrijfmotor is zeer efficiënt; de trein zelf heeft minder massa omdat het grootste deel van het aandrijfsysteem zich in de rails bevindt in plaats van op de trein; en er passen meer passagiers in de trein omdat de ruimte niet nodig is voor motoren. Oh, en misschien omdat de gegevens van het maglev productiebe-

drijf komen en geselecteerd zijn om de maglev beter uit te laten komen!

Mensen die de Transrapid in Sjanghai hebben gezien, vertelden mij ook dat hij op topsnelheid "ongeveer even stil was als een straalvliegtuig".



Fig.20.34 Negen van de tien voertuigen in Londen zijn G-Wizes (en 95% van alle statistieken zijn vals)



Figuur 20.36. Trams werken ook goed in Istanboel en Praag.

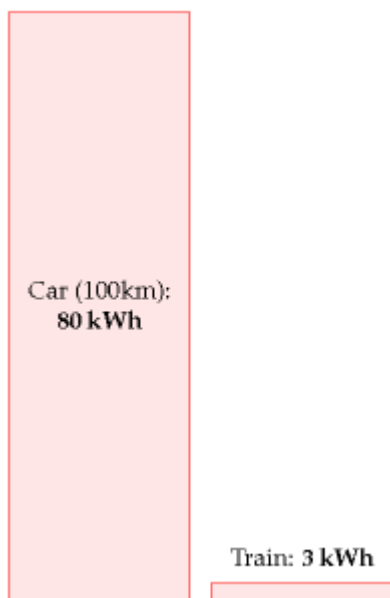


Fig.20.35. 100 km in een eenpersoonsauto, vergeleken met 100 km in een volledig bezette elektrische hogesnelheidstrein.

Opmerkingen en referenties

Pagina	
[135]	Een vaak geciteerde statistiek zegt iets als "slechts één procent van de gebruikte energie gaat naar het verplaatsen van de bestuurder" 119 Een veel geciteerde statistiek zegt: "Slechts 1% van de brandstofenergie in een auto gaat naar het verplaatsen van de bestuurder." In feite varieert het percentage in deze mythe in grootte naarmate hij in de stedelijke gemeenschap rondrijdt. Sommige mensen zeggen "5% van [152] de energie gaat in het verplaatsen van de bestuurder." Anderen zeggen: "Slechts drie tienden van 1 procent van de brandstofenergie gaat in het verplaatsen van de bestuurder." [4qgg8q] Mijn mening, tussen haakjes, is dat geen van deze statistieken juist of nuttig is.
[136]	De prestaties van de fiets zijn ongeveer gelijk aan die van de eco-auto. - De prestaties van de fiets zijn ongeveer gelijk aan die van de eco-auto. Fietsen op een éénpersoonsfiets kost ongeveer 1,6 kWh per 100 km, uitgaande van een snelheid van 20 km/u. Voor details en referenties, zie hoofdstuk A, p262.
[160]	Afb.20.4: Deze trein van 8 wagons De stoptrein met 8 rijtuigen van Cambridge naar Londen (figuur 20.4) weegt 275 ton, en kan 584 passagiers zittend vervoeren. De maximumsnelheid is 161 km/u (100 mph), en het vermogen is 1,5MW. Als alle zitplaatsen bezet zijn, verbruikt deze trein op topsnelheid maximaal 1,6 kWh per 100 reizigers-kilometer.
[137]	De Londense metro 120 Londense metro. Een trein van de Victoria-lijn bestaat uit vier wagons van 30,5 ton en vier wagons van 20,5 ton (de eerste dragen de motoren). Beladen weegt een gemiddelde trein 228 ton. De maximumsnelheid is 45 mijl/u. De gemiddelde snelheid is 31 mijl/u. Een trein met de meeste zitplaatsen bezet vervoert ongeveer 350 passagiers; volgeladen vervoert de trein er ongeveer 620. Het energieverbruik in de spits is ongeveer 4,4 kWh per 100 reizigers-km (Catling, 1966).
[137]	hogesnelheidstreinen, 121 Hogesnelheidstrein. Een diesel-aangedreven intercity 125-trein (rechts in figuur 20.5) weegt 410 ton. Bij een snelheid van 125 km/uur is het geleverde vermogen "aan de rail" 2,6MW. Het aantal passagiers in een volle trein bedraagt ongeveer 500. Het gemiddelde brandstofverbruik is ongeveer 0,84 liter diesel per 100 zitplaats-km [5o5x5m], wat neerkomt op een transport-verbruik van ongeveer 9 kWh per 100 zitplaats-km. De elektrische trein van klasse 91 (links in figuur 20.5) rijdt met 140 mph (225 km/h) en verbruikt 4,5MW. Volgens Roger Kemp is het gemiddelde energieverbruik van deze trein 3 kWh per 100 zitplaats-km [5o5x5m]. In het regeringsdocument [5fbeg9] staat dat de treinen van de oostkust-hoofdlijn en de westkust-hoofdlijn beide ongeveer 15 kWh per km verbruiken (hele trein). Het aantal zitplaatsen in elke trein is respectievelijk 526 of 470. Dat is dus 2,9-3,2 kWh per 100 zitplaats-km.
[137]	In de periode 2006-7 bedroegen de totale energiekosten – de totale energiekosten van alle Londense metro's, was 15 kWh per 100 p-km. . . . De energiekost van alle Londense bussen was 32 kWh per 100 p-km. Bron: [679rpc]. Bron voor treinsnelheden en bussnelheden: Ridley en Catling (1982).
[137]	das Croydon Tramlink Systeem – Croydon Tramlink. www-tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/TfL-environment-report-2007.pdf, www-tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-Travel-Report-2007-final.pdf,

	www.croydon-tramlink.co.uk .
[139]	de aanleg van uitstekende fietspaden – 123 . . uitstekende fietsvoorzieningen . . . De Britse street design guide [www-manualforstreets.org.uk] moedigt aan om straten zo te ontwerpen dat 20 mijl per uur de natuurlijke snelheid wordt. Zie ook Franklin (2007).
[141]	een eerlijke en eenvoudige methode voor congestieheffingen 124 Een eerlijke en eenvoudige methode voor congestie-aanrekening. Ik heb van Stephen Salter een briljante manier geleerd om de congestieheffing te automatiseren. Een eenvoudige dagelijkse congestieheffing, zoals die in Londen wordt geheven, geeft slechts een ruw signaal aan bestuurders; als een autobezitter eenmaal heeft besloten de dagheffing te betalen en een congestiezone in te rijden, heeft hij geen stimulans om weinig in de zone te rijden. Evenmin wordt hij beloond met een korting als hij zorgvuldig routes in de zone kiest die niet door congestie worden getroffen. In plaats van een gecentraliseerde autoriteit [153] die van tevoren beslist waar en wanneer de congestiezones zijn, met dure en opdringerige controle en registratie van voertuigbewegingen naar en binnen al die zones, heeft Salter een eenvoudiger, gedecentraliseerde, anonieme methode om bestuurders te laten betalen voor het rijden in druk, langzaam verkeer, waar en wanneer dat ook werkelijk bestaat. Het systeem zou in het hele land werken. Hier is hoe het werkt. We willen een apparaat dat antwoord geeft op de vraag "Hoe druk is het verkeer waarin ik rij?" Een goede maatstaf voor congestie is "hoeveel andere actieve voertuigen zijn dicht bij het mijne?" In snelverkeer is de afstand tussen voertuigen groter dan in langzaam verkeer. Verkeer dat in lange files staat, is het dichtst opeengepakt. Het aantal voertuigen in de buurt dat actief is, kan anoniem worden vastgesteld door in elk voertuig een radiozender/-ontvanger (zoals een zeer goedkope mobiele telefoon) aan te brengen die kleine radiosignalen uitzendt in een gestaag tempo wanneer de motor draait, en die het aantal signalen telt dat hij van andere voertuigen hoort. De congestieheffing zou evenredig zijn met het aantal ontvangen pieptonen; deze heffing zou kunnen worden betaald bij tankstations telkens wanneer het voertuig wordt bijgetankt. De radiozender/ontvanger zou de huidige Britse wegenbelastingsschijf vervangen.
[142]	Vliegwielen of hydraulica besparen ongeveer 70% van de remenergie – 126 hydraulica en vliegwielen vangen tenminste 70% van de remenergie op. Perslucht wordt gebruikt voor regeneratief remmen in vrachtwagens; eaton-com zegt dat "hydraulic launch assist" 70% van de kinetische energie opvangt. [5cp27j] Het vliegwielsysteem van flybridsystems-com vangt ook 70% van de kinetische energie op. www-flybridsystems.com/F1System.html Elektrisch regeneratief remmen levert 50% op. Bron: E4tech (2007).
[142]	batterijen in deze vermogensklasse wegen ongeveer 200 kg. - Elektrische batterijen die 60 kW kunnen leveren, zouden ongeveer 200 kg wegen. Goede lithium-ion-accu's hebben een specifiek vermogen van 300 W/kg (Horie et al., 1997; Mindl, 2003).
[142]	gemiddelde nieuwe auto in Engeland met 168 g CO₂ per km - de gemiddelde nieuwe auto in het VK stoot 168 g CO ₂ per km uit. Dit is het cijfer voor het jaar 2006 (King, 2008). In de VS bedroeg de gemiddelde uitstoot van een nieuwe personenauto 255 g per km (King, 2008).
[142]	Hybride auto's zoals de Toyota Prius (fig.20.19) hebben efficiëntere motoren - De Toyota Prius heeft een zuinigere motor. De benzinemotor van de Prius maakt gebruik van de Atkinson-cyclus, in tegenstelling tot de conventionele Otto-cyclus. Door op een slimme manier elektrische energie en benzinekracht te mengen naarmate de vraag van de bestuurder verandert, kan de Prius toe met een kleinere motor dan normaal is in een

	auto van zijn gewicht, en zet hij benzine efficiënter om in arbeid dan een conventionele benzinemotor.	
[143]	In de praktijk blijken hybride technologieën een besparing van 20% of 30% op te leveren. – Hybride technologieën leveren brandstofbesparingen op van 20% of 30%. Bijvoorbeeld, uit het onderzoeksrapport van Hitachi waarin hybride treinen worden beschreven (Kaneko et al., 2004): een zeer efficiënte energieopwekking en regeneratief remmen zullen "naar verwachting een brandstofbesparing van ongeveer 20% opleveren vergeleken met conventionele treinen die op diesel rijden".	
[144]	Het feit dat slechts 8,3% van de forenzen meer dan 30 km naar hun werk reizen -. 127 Slechts 8,3% van de pendelaars reist meer dan 30 km naar hun werkplek. Bron: Eddington (2006). De afhankelijkheid van de actieradius van een elektrische auto van de grootte van de accu wordt besproken in hoofdstuk A (p261).	
[144]	Prestatie-indicatoren voor grote aantallen elektrische auto's - Veel elektrische voertuigen. Ze zijn allemaal hieronder opgesomd, in willekeurige volgorde. De prestatiecijfers zijn voornamelijk afkomstig van de fabrikanten. Zoals we op p127 hebben gezien, komen de prestaties in de praktijk niet altijd overeen met de beweringen van de fabrikanten.	
[154]]	Th!nk elektrische auto's uit Noorwegen. De vijfdeurs Th!nk Ox heeft een actieradius van 200 km. (Fig 20.37) Zijn batterijen wegen 350 kg, en de auto weegt in totaal 1500 kg. Zijn energieverbruik is ongeveer 20 kWh per 100 km. www-think.no	
	<i>Fig.20.37: Th!nk Ox. Foto von www-think.no</i>	
	Electric Smart Car "De elektrische versie wordt aangedreven door een 40 pk motor, kan tot 70 mijl rijden en heeft een topsnelheid van 70 mph. Het opladen gebeurt via een standaard stopcontact en kost ongeveer £1,20, waarbij de centrale het equivalent van 60 g/km aan koolstofdioxide-uitstoot produceert. Een volledige oplading duurt ongeveer acht uur, maar de batterij kan van 80% leeg naar 80% opgeladen worden in ongeveer drie en een half uur. [www-whatcar.com/newsarticle.aspx?NA=226488]	
	Berlingo Electrique 500E , een stadsbestelwagen (figuur 20.20), heeft 27 nicad-batterijen en een motor van 28 kW. Hij kan een laadvermogen van 500 kg vervoeren. Topsnelheid: 100 km/u; actieradius: 100 km. 25 kWh per 100 km. (Schatting vriendelijk verstrekt door een Berlingo-eigenaar.) [4wm2w4]	
	i MiEV Deze elektrische auto heeft naar verwachting een actieradius van 160 km met een accupakket van 16 kWh. Dat is 10 kWh per 100 km - beter dan de G-Wiz - en terwijl het moeilijk is om twee volwassen Europeanen in een G-Wiz te laten passen, heeft het Mitsubishi-prototype vier deuren en vier volwaardige zitplaatsen (figuur 20.38). [658ode]	
	<i>Afb.20.38: De i MiEV van Mitsubishi Motors Corp. Hij heeft een motor van 47 kW, weegt 1080 kg en heeft een topsnelheid van 130 km/u.</i>	

	EV1 De tweezits EV1 van General Motors had een bereik van 120 tot 240 km per lading, met nikkel-metaalhydride batterijen die 26,4 kWh bevatten. Dat is een energieverbruik tussen 11 en 22 kWh per 100 km.
	Lightning (figuur 20.39) - heeft vier borstelloze motoren van 120 kW, één op elk wiel, regeneratief remmen, en snellaadbare Nanosafe lithiumtitanaat-batterijen. Een capaciteit van 36 kWh geeft een bereik van 200 mijl (320 km). Dat is 11 kWh per 100 km. <i>Fig.20.39: Lightning: 11 kWh pro 100 km. Foto von www-lightningcarcompany.co.uk</i> 
	Aptera Deze fantastische glibberige vis is een tweezitsvoertuig, waarvan wordt gezegd dat het 6 kWh per 100 km aan energie kost. Hij heeft een luchtweerstandscoefficiënt van 0,11 (figuur 20.40). Elektrische en hybride modellen zijn in ontwikkeling.  <i>Fig.20.40: Der Aptera. Foto von www-aptera.com</i>
	 Loremo Net als de Aptera heeft de Loremo (figuur 20.41) een klein frontaal oppervlak en een kleine luchtweerstandscoefficiënt (0,2) en hij zal zowel in een fossiele als in een elektrische versie verkrijgbaar zijn. Hij heeft twee zitplaatsen voor volwassenen en twee naar achteren gerichte kinderzitjes. [155] De Loremo EV zal lithium-ion batterijen hebben en zal naar verwachting een energiekost hebben van 6 kWh per 100 km, een topsnelheid van 170 km/u, en een bereik van 153 km. Hij weegt 600 kg.  <i>Fig.20.41: Der Loremo. Foto von evolution.loremo.com</i>
	eBox De eBox heeft een lithium-ion accu met een capaciteit van 35 kWh en een gewicht van 280 kg; en een actieradius van 140-180 mijl. De motor heeft een piekvermogen van 120 kW en kan een continu vermogen van 50 kW leveren. Energieverbruik: 12 kWh per 100 km.
	Ze-0 Een auto met vijf zitplaatsen en vijf deuren. Maximum snelheid: 50mph. Bereik: 50 mijl. Gewicht, inclusief batterijen: 1350 kg. Loodaccu's met capaciteit van 18 kWh. Motor: 15 kW. 22,4 kWh per 100 km.
	e500 Een Italiaanse Fiat-achtige auto, met twee deuren en vier zitplaatsen. Maximum snelheid: 60mph. Actieradius in de stad: 75 mijl. Batterij: lithium-ion polymeer.
	MyCar De MyCar is een tweezitter naar Italiaans ontwerp. Maximum snelheid: 40mph. Maximaal bereik: 60 mijl. Lood-zuur batterij.
	Mega City Een tweezitsauto met een maximaal continu vermogen van 4 kW en een maximumsnelheid van 40 mph: 11,5 kWh per 100 km. Gewicht onbeladen (inclusief batterijen) - 725 kg. De loodaccu's hebben een capaciteit van 10 kWh.

	De Xebra heeft een bereik van 40 km met een lading van 4,75 kWh. 12 kWh per 100 km. Maximum snelheid 65 km/u. Lood-zuur batterijen.
	TREV Het two-seater Renewable Energy Vehicle (TREV) is een prototype dat is ontwikkeld door de universiteit van Zuid-Australië (figuur 20.42). Deze driewieler heeft een actieradius van 150 km, een topsnelheid van 120 km/u, een massa van 300 kg, en lithium-ion-polymeerbatterijen van 45 kg. Tijdens een echte reis van 3000 km bedroeg het energieverbruik 6,2 kWh per 100 km. Venturi Fetish heeft een batterij van 28 kWh en weegt 248 kg. De auto weegt 1000 kg. Bereik 160-250 km. Dat is 11-17 kWh per 100 km. www-venturifetish.fr/fetish.html
	 Fig.20.42: Foto von www-uni-sa.edu.au
	Toyota RAV4 EV Dit voertuig - een volledig elektrische mini-SUV - werd door Toyota verkocht tussen 1997 en 2003 (figuur 20.43). De RAV4 EV heeft 24 12-volt 95Ah NiMH-accu's die 27,4 kWh aan energie kunnen opslaan; en een actieradius van 130 tot 190 km. Dat is dus een energieverbruik van 14-21 kWh per 100 km. De RAV4 EV was populair bij het politiekorps van Jersey.
	 Fig.20.43: Foto von Kenneth Adelman, www-solarwarrior.com
	De Phoenix SUT - een vijfzits "sport utility truck" van Californische makelij - heeft een actieradius van "maximaal 130 mijl" dankzij een lithium-ion batterijpakket van 35 kWh. (Dat is 17 kWh per 100 km.) De batterijen kunnen in 10 minuten via een speciaal stopcontact worden opgeladen. www-gizmag.com/go/7446/
	Leveringsvoertuig Modec vervoert twee ton over een afstand van 100 mijl. Eigen gewicht 3000 kg. www-modec.co.uk
	Smith Ampere Kleinere bestelwagen, 24 kWh lithium ion batterijen. Bereik "meer dan 100 mijl." www-smithelectricvehicles.com
[156]	Elektrische minibus van www-smithelectricvehicles.com: 40 kWh lithium ion accu-pakket. 90 kW motor met regeneratieve remmen. Actieradius "tot 100 mijl." 15 zitplaatsen. Eigengewicht 3026 kg. Laadvermogen 1224 kg. Dat is een voertuigprestatie van op zijn best 25 kWh per 100 km. Als het voertuig volledig bezet is, zou het vervoer kunnen leveren tegen een indrukwekkende kostprijs van 2 kWh per 100 p-km.
	Elektrische bus De Thunder Sky bus heeft een actieradius van 180 mijl en een oplaadtijd van drie uur. www-thunder-sky.com
	Elektrische scooters De Vectrix is een forse scooter (figuur 20.44). Zijn accu (nikkel-metaalhydride) heeft een capaciteit van 3,7 kWh. Hij kan tot 68 mijl rijden bij 25 mijl/u (40 km/u), op een twee uur durend opladen uit een standaard stopcontact.

	Dat is 110 km voor 3 kWh, of 2,75 kWh per 100 km. Hij haalt een maximumsnelheid van 100 km/u. Hij weegt 210 kg en heeft een piekvermogen van 20 kW. www-vectrix.com De "Oxygen Cargo" is een kleinere scooter. Hij weegt 121 kg, heeft een actieradius van 38 mijl en het duurt 2 tot 3 uur om hem op te laden. Piekvermogen: 3,5 kW; maximumsnelheid 28 mph. Hij heeft twee lithium-ion batterijen en regeneratieve remmen. De actieradius kan worden vergroot door extra accu's toe te voegen, die ongeveer 1,2 kWh kunnen opslaan en elk 15 kg wegen. Energieverbruik: 4 kWh per 100 km.	
	Figure 20.44. Vectrix: 2.75 kWh per 100 km. Photo from www-vectrix.com.	
[146]	De energiedichtheid van persluchtaccumulatoren bedraagt slechts ongeveer 11-28 Wh/kg.- 129 bedraagt de energiedichtheid van persluchttopslagplaatsen slechts ongeveer 11-28Wh per kg. De theoretische limiet, uitgaande van perfecte isothermische compressie: als 1m³ omgevingslucht langzaam in een vat van 5 liter wordt gecomprimeerd bij 200 bar, is de opgeslagen potentiële energie 0,16 kWh in 1,2 kg lucht. In de praktijk weegt een 5-liter vat dat geschikt is voor een dergelijke druk ongeveer 7,5 kg als het van staal is gemaakt, of 2 kg als kevlar of koolstofvezel wordt gebruikt, en de totale energiedichtheid zou ongeveer 11-28Wh per kg bedragen. De theoretische energiedichtheid is dezelfde, ongeacht het volume van de container.	
[146]	Arnold Schwarzenegger, lovend over hoe hij een waterstof-aangedreven Hummer tankt - 130 Arnold Schwarzenegger . . . die een waterstof-aangedreven Hummer tankt. <i>Nature</i> 438, 24 november 2005. Ik zeg niet dat waterstof 438 nooit nuttig zal zijn voor transport; maar ik zou hopen dat zo'n vooraanstaand tijdschrift als <i>Nature</i> de waterstofbandwagon met enige kritische bezinning zou benaderen, en niet alleen euforie. Waterstof en brandstofcellen zijn niet de weg die we moeten inslaan. Het besluit van de regering Bush en de staat Californië om de waterstofsnelweg te volgen is het slechtste besluit van de afgelopen jaren. James Woolsey, voorzitter van de adviesraad van de US Clean Fuels Foundation, 27 november 2007. In september 2008 schreef <i>The Economist</i>: "Bijna niemand betwist dat ... uiteindelijk de meeste auto's alleen door batterijen zullen worden aangedreven." Om daarentegen meer te horen van voorstanders van vervoer op waterstof, zie de pagina's van het Rocky Mountain Institute over de "HyperCar" www-rmi.org/hypercar/.	
[146]	CUTE Projekts (Clean Urban Transport for Europe) - In het project Clean Urban Transport for Europe lag de totale energie die nodig was om de waterstofbussen aan te drijven tussen 80% en 200% hoger dan die van de basis-dieselbus. Bronnen: CUTE (2006); Binder et al. (2006).	
	Fig.20.44: Vectrix: 2,75 kWh auf 100 km. Foto von www-vectrix.com	
[157]	146 Bijtanken van waterstof 7- Om de waterstofauto van BMW van brandstof te voorzien, is drie keer meer energie nodig dan voor een gemiddelde auto. De bagage-	

	ruimte van de BMW "Hydrogen 7" wordt voor de helft ingenomen door de waterstof-tank van 170 liter, die 8 kg waterstof kan bevatten, wat een bereik geeft van 200 km op waterstof [news.bbc.co.uk/1/hi/business/ 6154212.stm]. De calorische waarde van waterstof bedraagt 39 kWh per kg, en de best practice energiekosten voor het maken van waterstof bedragen 63 kWh per kg (bestaande uit 52 kWh aardgas en 11 kWh elektriciteit) (CUTE, 2006). Het vullen van de tank van 8 kg heeft dus een energiekost van minstens 508 kWh; en als die tank inderdaad 200 km haalt, dan is de energiekost 254 kWh per 100 km. De Hydrogen 7 en zijn waterstofcelneven zijn in veel opzichten gewoon opzichtige afleidingen. David Talbot, MIT Technology Review www-technologyreview.com/Energy/18301/
[147]	de Honda brandstofcel auto, de FCX Clarity, Honda's brandstofcelauto, weegt 1625 kg, slaat 4,1 kg waterstof op bij een druk van 345 bar, en heeft naar verluidt een actieradius van 280 mijl, met een verbruik van 57 mijl op de weg per kg waterstof (91 km per kg) in een standaard mix van rijomstandigheden [czjjo], [5a3ryx]. Uitgaande van de hierboven vermelde kosten voor het maken van waterstof en van de veronderstelling dat aardgas als belangrijkste energiebron wordt gebruikt, heeft deze auto een transportkost van 69 kWh per 100 km. Honda kan journalisten misschien wijsmaken dat waterstofauto's "emissievrij" zijn, maar het klimaat kunnen ze helaas niet voor de gek houden. Merrick Godhaven
[149]	Een lithium-ion batterij bestaat uit 3% lithium – 132 Bron: Fisher et al. (2006).
[149]	Lithiumspecialist R. Keith Evans zegt dat "zorgen over de beschikbaarheid van lithium . . . ongegrond zijn." - Evans (2008).
[150]	de "Economy Twins", twee Nederlandse lijnschepen – 133 ” www-ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm.
[150]	QE2: www-qe2.org.uk.
[151]	Het Transrapid magnetisch levitatie systeem – 134 www-transrapid.de

21 verwarming

Intelligente verwarming

Slimme verwarming In het vorige hoofdstuk hebben we aangetoond dat elektrificatie in het vervoer de energievraag kan terugdringen tot een vijfde van het huidige niveau; en dat openbaar vervoer en fietsen 40 keer energie-efficiënter kunnen zijn dan autorijden. En hoe zit het met verwarming? Wat voor energiebesparingen kunnen technologie of veranderingen in levensstijl hier opleveren? Het vermogen dat nodig is om een gebouw te verwarmen wordt verkregen door vermenigvuldiging van drie grootheden:

$$\text{Benodigd vermogen} = \frac{\text{gemiddeld temperatuurverschil} \times \text{lekkagesnelheid gebouw}}{\text{Efficiëntie van het verwarmingssysteem}}$$

Ik zal deze formule (die in Bijlage E nader wordt toegelicht) met een voorbeeld toelichten. Mijn huis is een twee-onder-een-kapwoning met drie slaapkamers, gebouwd rond 1940 (**Fig.21.1**). Het gemiddelde temperatuurverschil tussen binnen en buiten hangt af van de stand van mijn thermostaat en het weer. Als de thermostaat permanent op 20°C is ingesteld, bedraagt het gemiddelde temperatuurverschil 9°C. De leksnelheid van een gebouw beschrijft hoe snel warmte door de muren, ramen en kieren naar buiten stroomt als gevolg van het temperatuurverschil. Het lekpercentage wordt vaak de warmteverliescoëfficiënt van het gebouw genoemd. Het wordt gemeten in kWh per dag per graad Celsius temperatuurverschil. In bijlage E bereken ik dat de lekkage van mijn huis in 2006 7,7 kWh/d/°C bedroeg.



Fig.21.1: Het huis van de auteur

Het product

gemiddeld temperatuurverschil x lekkagesnelheid van het gebouw

is de snelheid waarmee warmte uit het huis stroomt door geleiding en luchtverversing. Bijvoorbeeld, als het temperatuurverschil 9°C is, dan is het warmteverlies slechts

$$9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C} \approx 70 \text{ kWh/d.}$$

Om ten slotte het vereiste vermogen te berekenen, delen we dit warmteverlies door het rendement van ons verwarmingssysteem. In mijn huis heeft de gascondensatieketel een rendement van 90%, dus geldt het volgende.

$$\text{Benodigd vermogen} = \frac{9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}}{0,9} = 77 \text{ kWh/d}.$$

Deze waarde is hoger dan onze schatting van ruimteverwarming uit hoofdstuk 7. Het is om twee redenen hoger. Ten eerste gaat deze formule ervan uit dat alle benodigde warmte door de ketel wordt geleverd, terwijl in de praktijk een deel van de afvalwarmte afkomstig is van andere bronnen, zoals bewoners, elektrische apparaten of zonnestraling; ten tweede zijn we er in hoofdstuk 7 van uitgegaan dat één persoon slechts twee kamers tegelijk op 20°C houdt, maar het warmhouden van een heel huis vergt uiteraard meer energie.

OK, dus hoe kunnen we het energieverbruik voor verwarming verminderen? Er zijn duidelijk drie aanvalslijnen.

[159]

1. Verlaag het gemiddelde temperatuurverschil. Dat kan door de thermostaat lager te zetten (of, als je vrienden helemaal boven hebt, door het weer te veranderen).
2. Verminder de lekkage van het gebouw. Dit kan door de isolatie van het gebouw te verbeteren - denk aan driedubbele beglazing, winddichtheid, zolderisolatie - of, radicaler, door het gebouw af te breken en opnieuw op te bouwen met optimale isolatie; of misschien door in een huis te gaan wonen met minder vloeroppervlak per persoon (de lekkage is over het algemeen groter naarmate de woonruimte groter is, aangezien de raam- en muuroppervlakken groter worden naarmate de woonruimte groter is).
3. Het verwarmingsrendement verhogen. Je denkt misschien dat 90% moeilijk te verslaan zal zijn, maar er zit eigenlijk heel wat meer in.

Koele technologie: de thermostaat

De thermostaat (samen met een warme wollen trui) is moeilijk te verslaan als het gaat om technologie die u veel waar voor uw geld geeft. Je zet de thermostaat lager, en je huis verbruikt minder energie. Magie. In Engeland, voor elke graad die je hun thermostaat terugdraait, verminder je het energieverlies met 10%. Draai de thermostaat terug van 20° naar 15° en je hebt je warmteverlies bijna gehalveerd. Dankzij de extra winsten uit afvalwarmte is de bespaarde verwarmingsenergie nog groter dan deze verliesreductie.

Maar helaas heeft deze opmerkelijke energiebesparende technologie neveneffecten. Sommige mensen noemen dit de thermostaat lager zetten een vermindering van de levenskwaliteit en zijn daar helemaal niet blij mee. Ik zal later enkele opmerkingen maken over hoe dit probleem van de levenskwaliteit kan worden omzeild. Laten we ondertussen, als bewijs dat "de belangrijkste slimme component in een huis met slimme verwarming de bewoner is", eens kijken naar **Fig.21.2**. Het toont een Carbon Trust onderzoek naar warmteverbruik in 12 identieke moderne huizen. De studie laat ons in verwondering achter over het gezin in huis 1, waarvan het warmteverbruik twee keer zo hoog is als dat van de heer en mevrouw Woolly in nummer 12. Maar we moeten ook naar de cijfers kijken: Het gezin in nr. 1 verbruikt 43 kWh per dag. Als dat veel lijkt, bedenk dan dat ik zojuist het verbruik van mijn eigen huis niet veel hoger had ingeschat. In feite was mijn gasverbruik van 1993 tot 2003 iets hoger dan 43 kWh per dag (**Fig.7.10**, blz. [059]), en ik dacht dat ik een zuinig iemand was! Het probleem is het huis. Alle moderne huizen in het Carbon Trust-onderzoek hadden een lekkage van $2,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}$, terwijl mijn huis een lekkage van $7,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}$ had! Mensen die in lekke huizen wonen....

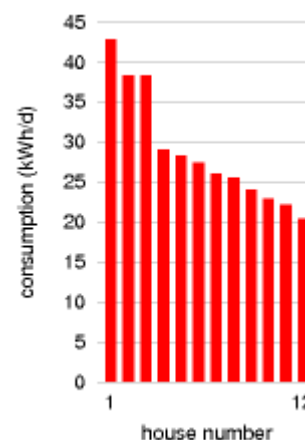


Fig.21.2: Werkelijk warmteverbruik in 12 identieke huizen met identieke verwarmingssystemen. Alle woningen hebben een woonoppervlakte van 86 m^2 en een lekkage van $2,7 \text{ kWh/d/}^{\circ}\text{C}$ volgens het plan. Bron: Carbon Trust (2007)

De strijd tegen lekkage

Wat kan er met oude, lekkende huizen gedaan worden anders dan de bulldozers bestellen? Fig.21.3 toont schattingen van de energie die nodig is voor ruimteverwarming in oude eengezins-, twee-onder-een-kap- en rijtjeshuizen als er meer en meer wordt gedaan aan isolatie. Extra isolatie van de zolder en de spouwmuur vermindert het warmteverlies van een typische oude woning met ongeveer 25%. [160] Dankzij de winst uit afvalwarmte leidt dit tot een besparing van verwarmingsenergie van ongeveer 40%.

Laten we deze ideeën op de proef stellen.

Een casestudy

Ik heb u mijn huis al voorgesteld op pagina 59 (**Fig.7.10**). Laten we het verhaal weer oppakken. In 2004 heb ik mijn oude gasketel vervangen door een condenserende gasketel. (Condensatieketels maken gebruik van een warmtewisselaar om restwarmte van de rookgassen over te brengen naar de inkomende lucht). Tegelijkertijd heb ik mijn warmwatertank gedemonteerd (warm water wordt nu alleen geleverd wanneer het nodig is), en heb ik thermostaten geïnstalleerd op de radiatoren

in alle slaapkamers. De nieuwe condensatieketel heeft ook een nieuw regelsysteem waarmee ik verschillende streeftemperaturen kan instellen, afhankelijk van het tijdstip van de dag. Met deze veranderingen heb ik mijn gemiddelde verbruik teruggebracht van 50 kWh/d naar 32 kWh/d.

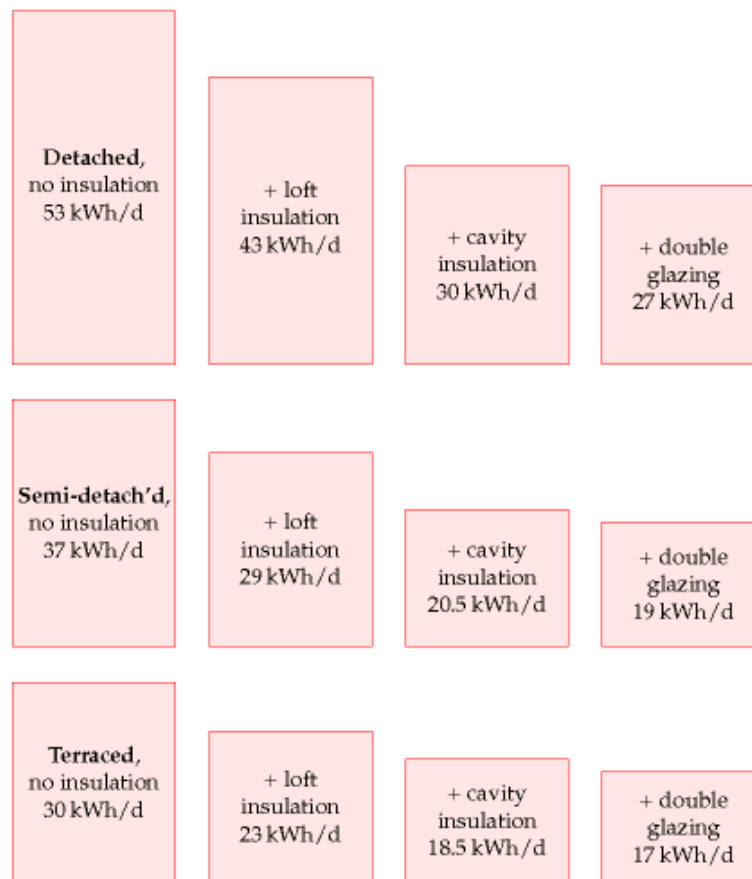


Fig.21.3: *Schattingen voor ruimteverwarming in verschillende Britse woningen. (Bovenaan: Eengezinswoning, middelste twee-onder-een-kap, onderste rijtjeswoning; l.t.k.: zonder isolatie, met zolderisolatie, aanvullend met spouwmuurisolatie, aanvullend met dubbele beglazing). Eden en Bending (1985).*

De vermindering van 50 tot 32 kWh/d is heel bevredigend, maar niet voldoende om de persoonlijke voetafdruk terug te brengen tot minder dan één ton CO₂ per jaar. 32 kWh/d gas staat gelijk aan meer dan 2 ton CO₂ per jaar. In 2007 begon ik meer aandacht te besteden aan mijn energiemeters. Ik had spouwmuurisolatie aangebracht (**afb.21.5**) en mijn zolderisolatie verbeterd. Ik verving mijn achterdeur met enkel glas door een deur met dubbel glas en plaatste een extra deur met dubbel glas voor het voorportaal (**Fig.21.6**). En het belangrijkste, ik lette meer op de instellingen van mijn thermostaat. [161] Deze aandacht leidde tot een verdere halvering van mijn gasverbruik. Vorig jaar was dat 13 kWh/d!

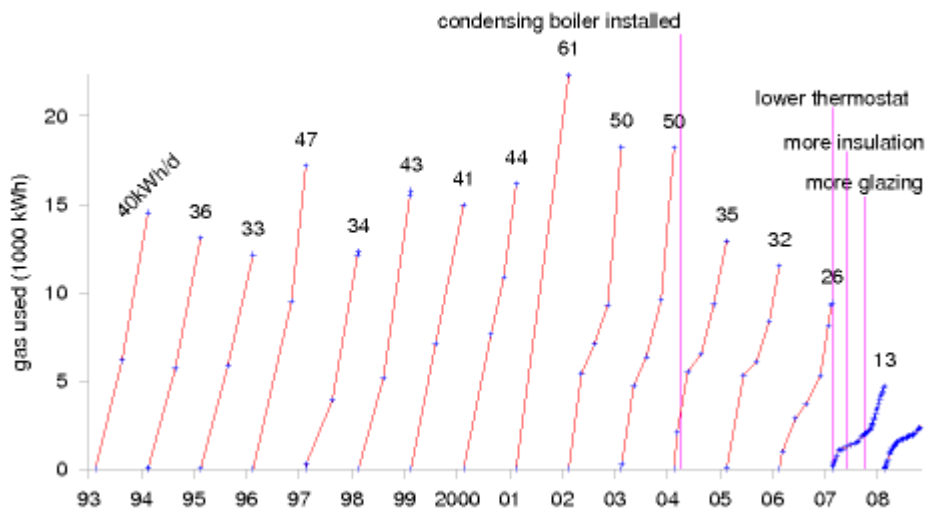


Fig.21.4: (boven) Mijn huishoudelijk gasverbruik, elk jaar van 1993 tot 2007. Elke lijn toont de cumulatieve verbruikscurve over het jaar in kWh. Het getal aan het eind is het gemiddelde verbruik voor dat jaar, in kWh per dag. De meterstanden worden aangegeven door de blauwe stippen. Het is duidelijk dat hoe vaker ik mijn meter aflees, hoe minder gas ik verbruik!



Fig.21.5: (links) Spouwmuurisolatie in uitvoering



Fig.21.6: (rechts) Een nieuwe toegangsdeur

Omdat deze casestudy zo'n wirwar is van aanpassingen aan gebouwen en gedragsveranderingen, is het moeilijk te zeggen wat het zwaarst woog. Volgens mijn berekeningen (in bijlage E) hebben mijn isolatiemaatregelen de lekkage met 25% verbeterd, van 7,7 kWh/d/°C tot 5,8 kWh/d/°C. Dat is nog altijd veel hoger dan nieuwbouw. Het is frustrerend hoe moeilijk het is om isolatie aan te brengen in een oud gebouw!

Dus mijn tip is slim thermostaatbeheer. Wat is een verstandige thermostaatstand om naar te streven? Tegenwoordig vinden veel mensen 17°C ondraaglijk koud. Toch was de gemiddelde wintertemperatuur in Engelse huizen in 1970 13°C! De menselijke perceptie van warmte hangt af van wat je aan het doen bent en wat je het laatste uur of zo gedaan hebt. Mijn advies is niet te denken in termen van thermostaat-

instellingen. In plaats van de thermostaat vast te zetten op een bepaalde temperatuur, kunt u hem beter het grootste deel van de tijd op een lage temperatuur laten (bijvoorbeeld 13 of 15°C) en hem alleen af en toe hoger zetten als u het koud hebt. Het is als de verlichting in een bibliotheek. Als je jezelf toestaat de vraag te stellen: "Wat is de juiste verlichting op de planken?", dan zal het antwoord ongetwijfeld zijn: "Helder genoeg om de titels van de boeken te lezen," en zul je de hele tijd felle lampen aan hebben. Maar de in het begin gestelde vraag impliceert dat we de helderheid constant moeten maken; maar dat hoeft helemaal niet zo te zijn. We kunnen lichtschakelaars installeren die de lezer kan omzetten, en die zichzelf na een redelijke tijd uitschakelen. Evenzo hoeven thermostaten niet altijd op 20°C te staan.

[162] Voordat wij het onderwerp van de thermostaatinstellingen verlaten, moet ik de airconditioning noemen. Wordt u er niet gek van om in de zomer een gebouw binnen te lopen waar de airco op 18°C staat? Die idiote gebouwbeheerders confronteren iedereen met temperaturen die ze in de winter veel te koud zouden vinden! Volgens de "Cool-Biz"-richtlijnen van de Japanse regering moet de airconditioning op 28°C worden ingesteld.

Betere huizen

Als u de kans hebt om een nieuw huis te bouwen, zijn er heel wat mogelijkheden om ervoor te zorgen dat de verwarmingsbehoeften veel lager zijn dan die van een oud huis. **Fig.21.2** gaf ons reeds de aanwijzing dat moderne huizen volgens aanzienlijk betere thermische isolatienormen zijn gebouwd dan die uit de jaren veertig. Maar de bouwnormen in Engeland zouden nog beter kunnen, zoals besproken in Bijlage E. De drie basisideeën voor optimale resultaten zijn: (1) Zorg voor zeer dikke isolatielagen in vloeren, muren en daken; (2) Zorg ervoor dat het gebouw volledig luchtdicht is en een actieve ventilatie heeft die verse lucht naar binnen blaast en muffe, vochtige lucht naar buiten, met passieve warmtewisselaars die veel van de uitlaatwarmte terugwinnen. (3) Ontwerp het gebouw zo dat het zoveel mogelijk van de zonneschijn profiteert.

De energiekosten van verwarming

Tot nu toe hebben we ons geconcentreerd op de temperatuurregeling en de lekkage. Nu komen we bij de derde factor in de vergelijking:

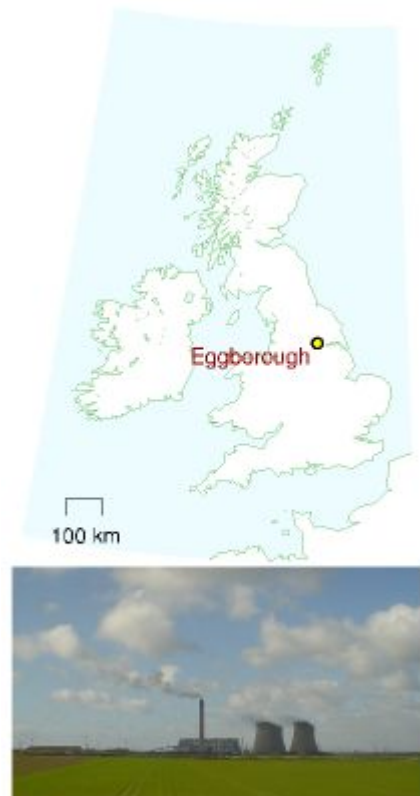


Fig.21.7: Eggborough. Geen centrale die meedoet aan slimme verwarming.

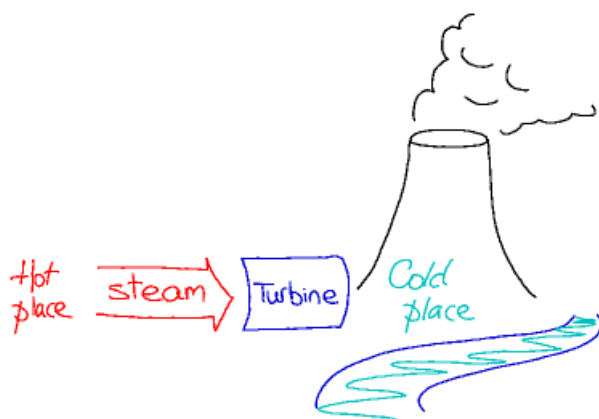
$$\text{Benodigd vermogen} = \frac{\text{gemiddeld temperatuurverschil} \times \text{leksnelheid gebouw}}{\text{Efficiëntie van het verwarmingssysteem}}$$

Hoe efficiënt kan warmte worden geproduceerd? Kunnen we goedkoop aan warmte komen? Tegenwoordig wordt de verwarming van gebouwen in Engeland hoofdzakelijk verzorgd door een fossiele brandstof, aardgas, in verwarmingsketels met rendementen van 78%-90%. Kunnen we afstappen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en tegelijkertijd de verwarming van gebouwen efficiënter maken?

Eén technologie die klaar staat als antwoord op het verwarmingsprobleem is warmtekrachtkoppeling (WKK), of de aftakking daarvan, gedistribueerde WKK. Ik zal hier WKK introduceren, maar ik ben tot de conclusie gekomen dat het een slecht idee is omdat we een betere technologie hebben voor verwarming, namelijk de warmtepomp, die ik hieronder zal beschrijven.

Warmtekrachtkoppeling

Het algemene beeld van conventionele grote centrale centrales is waarschijnlijk dat zij vreselijk inefficiënt zijn en de warmte willoos via de schoorstenen en koeltorens omhoog blazen. Een meer gesofisticeerd standpunt erkent dat om thermische energie om te zetten in elektriciteit, wij onvermijdelijk warmte moeten afgeven aan een koude plaats (**Fig.21.8**). Dit is hoe warmtemotoren werken. Er moet een koude plek zijn. Maar, zo wordt betoogd, we kunnen toch ook gebouwen gebruiken om de "verloren" warmte op te vangen in plaats van koeltorens of zeewater? Dit principe wordt "warmtekrachtkoppeling" (WKK) genoemd, de daarvoor benodigde apparatuur WKK-centrales, en het wordt in Europa al tientallen jaren toegepast - in veel steden is een grote elektriciteitscentrale geïntegreerd in een stadsverwarmingssysteem. Voorstanders van de moderne incarnatie van dit principe stellen voor dat in één gebouw (of voor een kleine groep aangrenzende gebouwen) tegelijk een kleine WKK-centrale wordt gebouwd, die warmte en elektriciteit levert voor dat gebouw (of die gebouwen) en overtollige elektriciteit teruglevert aan het net.



Afb.21.8: Hoe een krachtcentrale werkt. Er moet een koude plaats zijn waar de stoom kan condenseren, zodat de turbine kan draaien. De koude plaats is meestal een koeltoren of een rivier.

Er schuilt zeker enige waarheid in het feit dat Engeland tamelijk achtergebleven is op het gebied van stadsverwarming en WKK, maar de discussie hierover wordt bemoeilijkt door een gebrek aan cijfers en door twee fundamentele misvattingen. Ten eerste wordt bij het vergelijken van verschillende soorten brandstofgebruik de term "efficiëntie" vaak verkeerd gebruikt, namelijk alsof elektrische energie gelijk is aan thermische energie. In werkelijkheid is elektriciteit echter waardevoller dan warmte. Ten tweede wordt algemeen aangenomen dat de "verloren" warmte (afvalwarmte) in een conventionele elektriciteitscentrale kan worden ingezameld voor een nuttig doel zonder dat de elektriciteitsproductie van de centrale daaronder te lijden heeft. Helaas is dit niet waar, zoals uit de cijfers zal blijken. Het leveren van nuttige warmte aan klanten vermindert altijd tot op zekere hoogte de elektriciteitsproductie. De werkelijke nettowinst van warmtekrachtkoppeling is vaak veel lager dan de mediahype ons wil doen geloven.

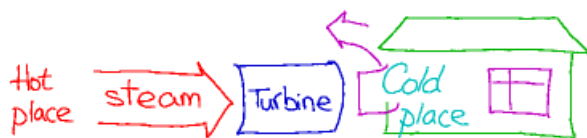


Fig.21.9: *Warmtekrachtkoppeling. Stadsverwarming absorbeert de warmte die anders in de koeltoren zou worden weggeblazen.*

Een andere belemmering voor een rationele discussie over WKK is de recente mythe dat decentralisatie van een technologie deze op de een of andere manier groener maakt. [164] Dus kachels van kleine warmtekrachtcentrales zijn een "goede" zaak, terwijl grote gecentraliseerde warmtekrachtcentrales een "slechte" zaak zijn. Maar als decentralisatie echt een goed idee is, moet dat uit de cijfers blijken. Decentralisatie moet op eigen benen kunnen staan. Maar op dit moment lijken de cijfers uit te wijzen dat gecentraliseerde elektriciteitsopwekking zowel economisch als energetisch veel voordelen heeft. Alleen in zeer grote gebouwen heeft lokale opwekking voordelen, en dan nog in de orde van 10% of 20%.

De regering heeft zich ten doel gesteld de WKK-capaciteit tegen 2010 te verhogen tot 10 GW, maar ik denk dat deze uitbreiding van gasgestookte WKK een vergissing zou zijn. Dergelijke WKK-centrales zijn niet groen: zij gebruiken fossiele brandstoffen, en zij zetten ons vast in een voortgezet gebruik van fossiele brandstoffen. Ervan uitgaande dat warmtepompen de betere technologie zijn, denk ik dat we de gas-WKK-installaties moeten overslaan en meteen voor warmtepompen moeten gaan.

Warmtepompen

Warmtepompen worden, net als stadsverwarming en warmtekrachtkoppeling, reeds op grote schaal gebruikt in Europa, maar zijn nog zeer zeldzaam in Engeland. Warmtepompen zijn binnenstebuiten gekeerde koelkasten. Voel de achterkant van je koelkast, het is warm. Een koelkast verplaatst warmte van de ene plaats (de bin-

nenkant) naar de andere (de achterkant).

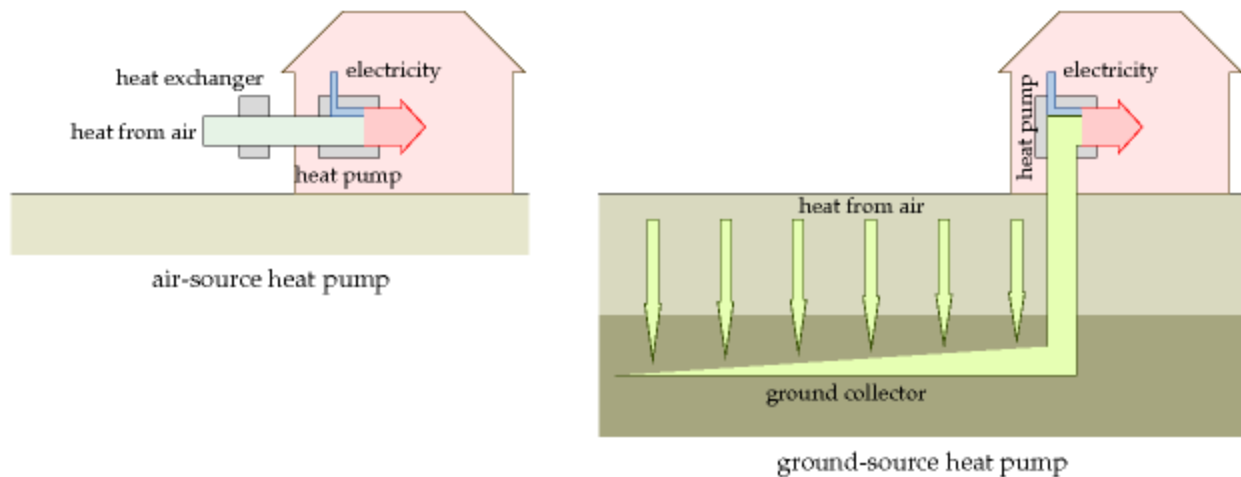


Fig.21.10: Warmtepompen

Om een gebouw te verwarmen wordt de koelkast dus omgedraaid - de binnenkant gaat naar de tuin, zodat de tuin wordt afgekoeld; de achterkant blijft in de keuken, zodat het huis wordt verwarmd. Wat niet duidelijk is in dit gedachtenexperiment, is dat het een heel efficiënte manier is om je huis op te warmen. Voor elke kilowatt die deze omgekeerde koelkast aan het elektriciteitsnet onttrekt, kan hij drie kilowatt warmte uit de achtertuin pompen, zodat er in totaal vier kilowatt warmte naar uw huis gaat. Warmtepompen zijn ongeveer vier keer efficiënter dan elektrische ovens. Waar het rendement van een elektrische oven 100% is, is dat van een warmtepomp 400%. Het rendement van een warmtepomp wordt meestal de Coëfficiënt of Performance (CoP) genoemd. Als de efficiëntie 400% is, dan is de CoP 4.

Afb.21.11: De binnenste en de buitenste component luchtwarmtepomp met een prestatiecoëfficiënt van 4. Aan de binnenste is een pen bevestigd ter vergelijking van de afmetingen. Een van deze Fujitsu-machines kan 3,6 kW verwarmingsvermogen leveren met 0,845 kW elektrisch vermogen. Hij kan ook in omgekeerde richting werken en levert dan 2,6 kW koelvermogen met 0,655 kW elektriciteit.



Warmtepompen kunnen op een aantal manieren worden ontworpen (**Afb.21.10**). Een warmtepomp kan de lucht in uw tuin koelen met een warmtewisselaar (typisch een 1m hoge witte doos, **Fig.21.11**). In dit geval wordt het een luchtwarmtepomp genoemd. Een andere mogelijkheid is dat de pomp de grond koelt via grote lussen van ondergrondse leidingen (tientallen meters lang); dit wordt dan een bodemwarmtepomp genoemd. Bovendien kan warmte worden opgepompt uit rivieren of meren.

Sommige warmtepompen kunnen in beide richtingen pompen. Wanneer een lucht-warmtepomp in omgekeerde richting werkt, gebruikt hij elektriciteit om de buitenlucht te verwarmen en de binnenlucht te koelen. [165] Dit wordt dan airconditioning genoemd. In feite zijn veel airconditioners warmtepompen die net zo werken. Geothermische warmtepompen kunnen ook als airconditioners werken. Hetzelfde apparaat kan dus verwarming produceren in de winter en koeling in de zomer.

Men zegt wel eens dat geothermische warmtepompen "geothermische energie" gebruiken, maar dat is niet de juiste term. Zoals we in hoofdstuk 16 hebben gezien, levert geothermische energie in de meeste gebieden op aarde slechts een klein beetje energie per oppervlakte-eenheid (ongeveer 50 mW/m^2); warmtepompen hebben niets te maken met dit kleine beetje, en ze kunnen worden gebruikt voor verwarming en koeling. Warmtepompen gebruiken alleen de grond om warmte uit te zuigen of in te pompen. Wanneer zij voortdurend warmte wegzuigen, wordt deze juist aangevuld door de opwarmende kracht van de zon.

Er zijn nog twee dingen te doen voor dit hoofdstuk. We moeten warmtepompen vergelijken met warmtekrachtkoppeling en we moeten de beperkingen van geothermische warmtepompen bespreken.

Warmtepompen vergeleken met vermogenswarmtepompen

Ik dacht eerst dat het principe van CHP – combined heat and power – een goed argument was. "Het is duidelijk dat we afvalwarmte van elektriciteitscentrales moeten gebruiken om gebouwen te verwarmen in plaats van het door koeltorens te blazen!" Maar als je goed kijkt naar de cijfers die de prestaties van een WKK-centrale beschrijven, kom je tot de conclusie dat er betere manieren zijn om elektriciteit en verwarming van gebouwen te leveren.

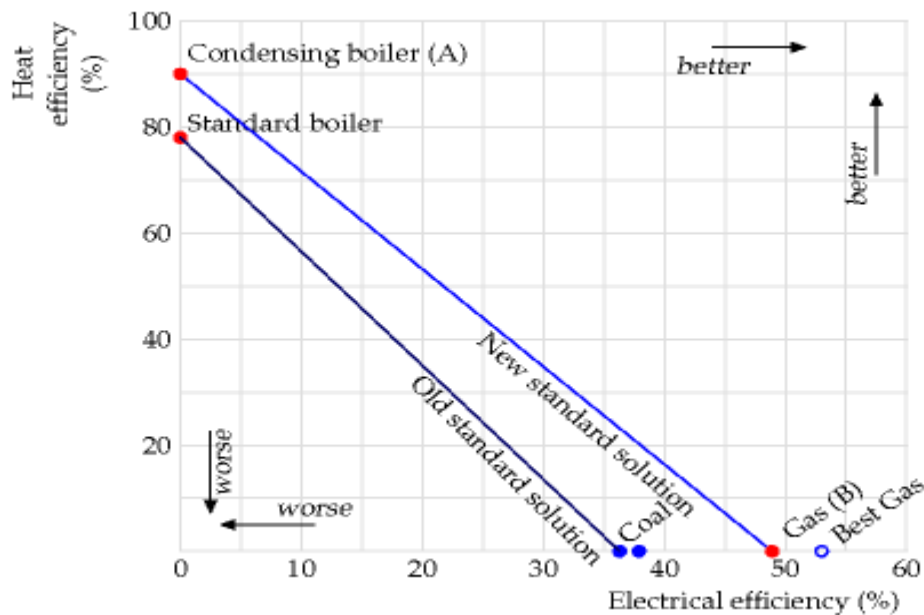
Ik ga een grafiek maken in drie fasen. Het diagram toont hoeveel elektrische energie of warmte-energie kan worden verkregen uit chemische energie. De horizontale as vertegenwoordigt het elektrisch rendement, de verticale as het verwarmingsrendement.

De standaardoplossing zonder WKK

In de eerste stap tekenen we standaard elektriciteitscentrales en verwarmingssystemen die pure elektriciteit of pure warmte leveren.

[166] Condensatieketels – moderne CV-ketel – (de punt A linksboven) hebben een rendement van 90% omdat 10% van de warmte ontsnapt via de schoorsteen. De gasgestookte elektriciteitscentrales van Engeland (de punt B rechtsonder) zijn momenteel 49% efficiënt bij het omzetten van gas in elektriciteit. Als we een bepaalde mix van elektriciteit en warmte uit aardgas nodig hebben, kunnen we die leveren door passende hoeveelheden gas te verbranden in gasgestookte elektriciteitscentrales of in

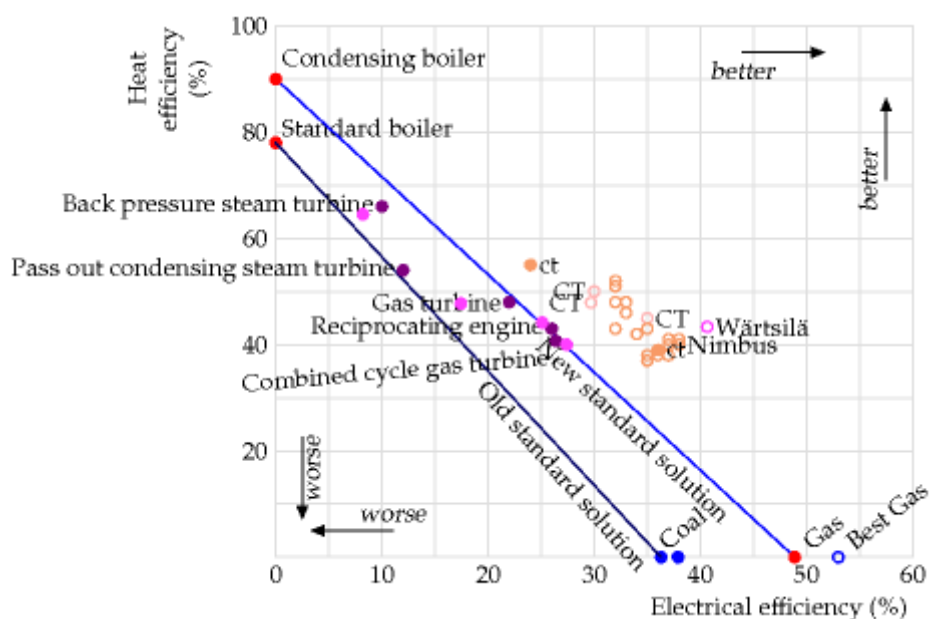
boilers. Deze nieuwe standaardoplossing produceert dan elektrische energie en verwarmingsenergie met de door route A-B gegeven rendementen door daarvoor elektriciteit en warmte te produceren in twee verschillende soorten installaties.



Voor een historische vergelijking teken ik in het diagram ook het oude standaardverwarmingssysteem – 'Oude' CV-ketel – gasketel zonder warmteterugwinning, rendement 79%) en kolengestookte elektriciteitsopwekking (elektrisch rendement 37% of zo), dat enkele decennia geleden nog gangbaar was.

Warmtekrachtkoppeling

Vervolgens tekenen wij WKK-installaties op het diagram. Zij produceren gelijktijdig elektriciteit en warmte uit chemische energie.



[167] Elk ingevuld punt staat voor de werkelijke prestaties van een type WKK-centrale die in Engeland in bedrijf is. De cirkels met "CT" geven de prestaties van geïdealiseerde systemen weer, zoals geciteerd door "Carbon Trust". De cirkels bij "Nimbus" geven gegevens van de fabrikant weer. De stippen met "ct" staan voor twee echte systemen uit het "Carbon Trust" document (Freeman Hospital en Elizabeth House).

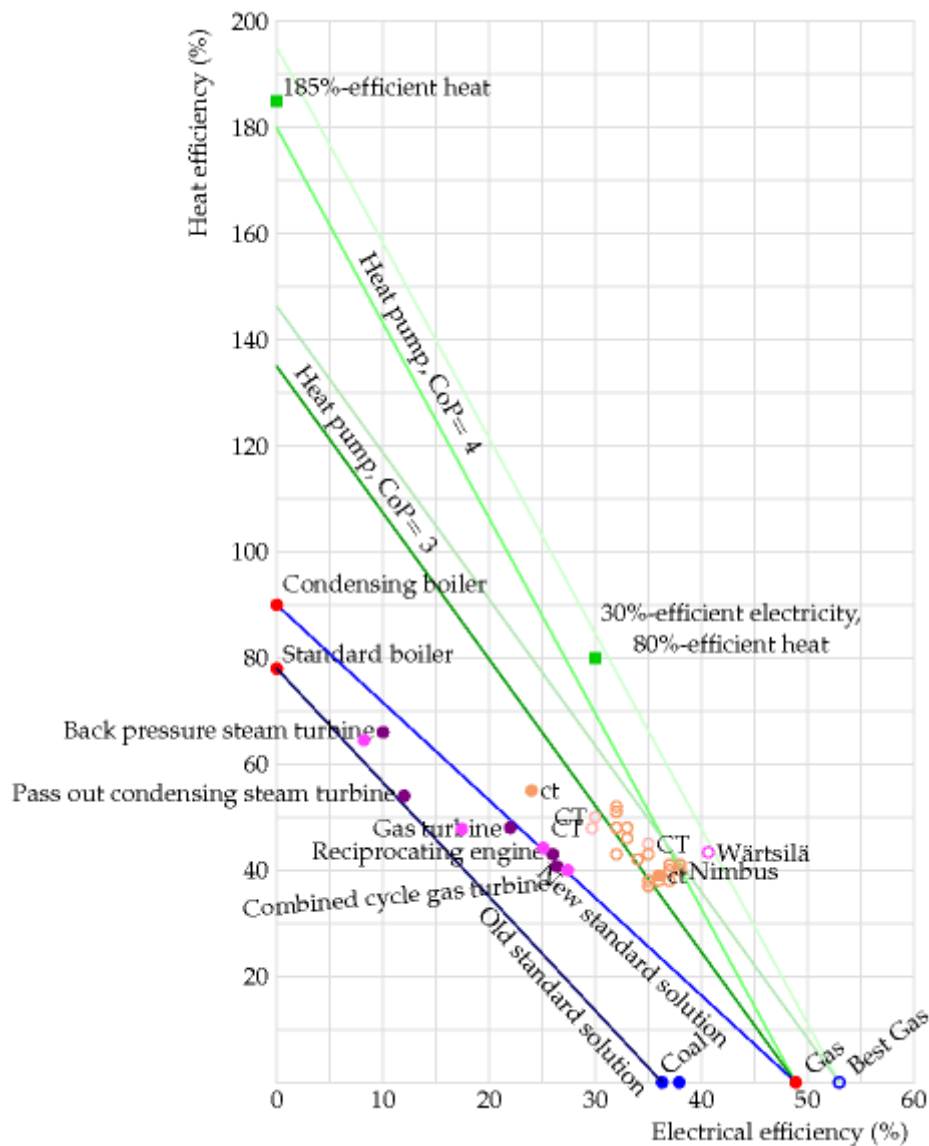
In dit diagram is met name te zien dat het elektrisch rendement van WKK-systemen aanzienlijk lager is dan de 49% van de eenvoudige installatie met alleen elektriciteit. Warmte is dus geen gratis bijproduct. Verhoging van de warmteproductie verslechtert de elektriciteitsproductie.

Het is gebruikelijk om de twee getallen (rendement van elektriciteitsproductie en rendement van warmteproductie) bij elkaar op te tellen tot een "totaal rendement" - zo zouden bijvoorbeeld stoomturbines met uitlaatgastegendruk met 10% elektriciteit en 66% warmte dan 76% efficiënt worden genoemd, maar ik denk dat dat misleidend is. Volgens deze metriek zou de condensatieketel met een rendement van 90% "beter en efficiënter" moeten zijn dan om het even welk WKK-systeem! Maar in feite is **elektrische energie waardevoller dan warmte**. De WKK-punten in onze grafiek liggen ver boven het "oude standaardpad" (kolengestookte opwekking + gasgestookte ketel) en veel, vooral de "CT"-waarden, liggen ook boven het "nieuwe standaardpad" (gasgestookte centrale + condensatieketel). Maar we mogen niet vergeten dat deze efficiëntieverbeteringen gepaard gaan met een aantal beperkingen - een WKK-installatie levert alleen warmte in de nabijheid ervan, terwijl condensatieketels overal kunnen worden geplaatst waar een gastoevoer is; en vergeleken met het standaardtraject zijn WKK-systemen niet zo flexibel in de mix van elektriciteit en warmte die zij leveren; WKK-systemen werken alleen optimaal bij een vaste elektriciteit-warmteratio; deze inflexibiliteit leidt tot extra inefficiëntie op momenten dat bijvoorbeeld overvloedige warmte wordt opgewekt. Zo wordt b.v. overvloedige warmte gegenereerd; in een typisch huishouden vindt een groot deel van de elektriciteitsvraag plaats in relatief smalle tijdsvensters die weinig verband houden met de warmtevraag. Bovendien is een ander probleem met sommige kleine WKK-centrales dat zij slecht zijn in het injecteren van overvloedige elektrische energie in het net.

Ten slotte voegen we warmtepompen toe die energie van het net gebruiken om omgevingswarmte in gebouwen te pompen.

De steile groene lijnen tonen combinaties van elektriciteit en warmte die mogelijk zijn met warmtepompen met een prestatiecoëfficiënt van respectievelijk 4 en 3, ervan uitgaande dat de extra elektriciteit die hiervoor nodig is, wordt opgewekt in gasgestookte elektriciteitscentrales met een gemiddeld of het hoogste rendement en dat 8% van deze extra elektriciteit verloren gaat in het elektriciteitsnet op weg van

de elektriciteitscentrale naar de warmtepomp. Het rendement van de gascentrale met het hoogste rendement bedraagt 53% onder veronderstelde optimale omstandigheden. (Ik denk dat de Carbon Trust en Nimbus ook soortgelijke veronderstellingen hebben gemaakt bij de berekening van de hier gebruikte cijfers voor WKK-centrales). In de toekomst zullen warmtepompen waarschijnlijk nog beter presteren dan hier is aangegeven. Dankzij massale overheidssteun voor efficiëntieverbeteringen zijn er in Japan al warmtepompen beschikbaar met een prestatiecoëfficiënt van 4,9.



Zoals u kunt zien, openen warmtepompen een systeem dat een "totaal rendement" van meer dan 100% heeft. Als onze veronderstelde gasgestookte elektriciteitscentrale met het hoogste rendement elektriciteit levert voor warmtepompen, kan daarmee een mix worden samengesteld met een elektrisch rendement van 30% en een

thermisch rendement van 80%, d.w.z. een "totaal rendement" van 110%. Geen enkel denkbaar WKK-systeem zou deze prestatie ooit kunnen leveren.

Laat me uitpraten. Warmtepompen zijn efficiënter dan condensatieketels, zelfs wanneer ze worden aangedreven door elektriciteit uit aardgascentrales. Als je veel huizen met aardgas wilt verwarmen, kun je ze uitrusten met condensatieketels die "90% efficiënt" zijn, of je kunt hetzelfde gas naar een moderne gasgestookte elektriciteitscentrale leiden, er elektriciteit mee opwekken, en die elektriciteit gebruiken om warmtepompen in alle gebouwen te laten draaien; het rendement van deze tweede oplossing ligt tussen 140% en 185%. Het is niet nodig grote gaten in de tuin te graven en vloerverwarming te installeren om te profiteren van de warmtepomp; de beste luchtwarmtepompen (die slechts een kleine externe kast vereisen, vergelijkbaar met die van een airconditioner) kunnen warm water leveren voor gewone radiatoren met een prestatiecoëfficiënt van meer dan 3. De luchtwarmtepomp van **Afb.21,11** levert warme lucht direct aan een kantoor.

Ik concludeer dat warmtekrachtkoppeling, hoewel het als een goed idee klinkt, waarschijnlijk niet de beste manier is om aardgas te gebruiken voor de productie van elektriciteit en warmte voor gebouwen, op voorwaarde dat in die gebouwen ook lucht- of grondwarmtepompen kunnen worden geïnstalleerd. De warmtepompoplossing heeft nog andere voordelen die niet onvermeld mogen blijven: Warmtepompen kunnen worden geïnstalleerd in elk gebouw [169] dat over een elektriciteitsvoorziening beschikt; zij kunnen draaien op elke elektriciteitsbron, zodat zij blijven draaien wanneer het aardgas op is of de gasprijs de pan uit rijst; en warmtepompen zijn flexibel: zij kunnen gemakkelijk worden in- en uitgeschakeld om aan de behoeften van de gebruikers van het gebouw te voldoen.

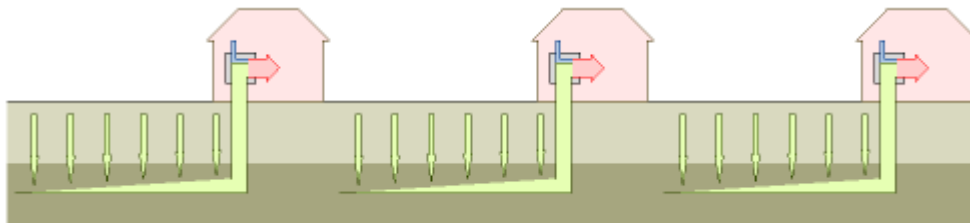
Ik wil benadrukken dat deze kritische vergelijking niet betekent dat CHP altijd een slecht idee is. Wat ik hier vergelijk zijn methoden voor het verwarmen van eenvoudige woningen die slechts geringe warmte nodig hebben. WKK kan ook warmte van een hoger niveau leveren voor industrieel gebruik (bv. 200°C). Onder dergelijke industriële omstandigheden zullen warmtepompen zeer waarschijnlijk slechter presteren omdat hun prestatiecoëfficiënten dan lager zijn.

Groeibelemmingen (voor warmtepompen)

Omdat de bodemtemperatuur op een diepte van enkele meters zeer traag de seizoensschommelingen volgt en altijd in de buurt van 11°C blijft, is de bodem theoretisch geschikter voor warmteonttrekking door een warmtepomp dan de lucht, die midden in de winter 10 of 15°C kouder is dan de bodem. Daarom bevelen warmtepompadviseurs waar mogelijk grondwarmtepompen aan. (Warmtepompen werken minder efficiënt wanneer er grote temperatuurverschillen zijn tussen binnen en buiten).

Maar de grond is geen onbeperkte bron van warmte. De warmte moet ergens vandaan komen, en grond is geen goede warmtegeleider. Als we er te veel warmte aan onttrekken, bevriest de grond en wordt het voordeel van de bodemwarmtepomp kleiner.

In Engeland zullen warmtepompen voornamelijk worden gebruikt om gebouwen in de winter te verwarmen. De uiteindelijke bron van de warmte die in dit proces wordt gepompt is de zon, die de warmte die aan de grond wordt onttrokken aanvult door middel van directe straling en door geleiding door de lucht. [170] De snelheid waarmee warmte aan de grond wordt onttrokken moet aan twee voorwaarden voldoen:



Afb.21.12: Hoe dicht kun je grondwarmtepompen bij elkaar plaatsen?

De temperatuur van de bodem mag in de winter niet te sterk dalen en alle warmte die in de winter wordt onttrokken, moet in de zomer op de een of andere manier weer kunnen worden aangevuld. Als het risico bestaat dat de natuurlijke warmterugvloeiing in de zomer niet voldoende zal zijn om de in de winter onttrokken warmte te vervangen, moet actief naar aanvulling worden gestreefd - bijvoorbeeld door het systeem in de zomer in omgekeerde richting te laten draaien en warmte in de bodem te pompen (wat het extra koelingseffect van airconditioning heeft).

Laten we deze discussie voeden met cijfers. Hoeveel grond heeft een geothermische warmtepomp nodig? Laten we uitgaan van een vrij hoge bevolkingsdichtheid in de buurt - laten we zeggen 6200 mensen per km² (160 m² per persoon), de dichtheid van een typisch Engels stadscentrum. Kan iedereen dan een grondwarmtepomp laten draaien, zonder actieve bijlading in de zomer? Een berekening in bijlage E geeft een voorlopig antwoord van "nee": als iedereen in de buurt 48 kWh/d per persoon (mijn schatting van de verwarmingsbehoefte in de winter) aan de grond onttrekt, zal de grond in de winter uiteindelijk bevriezen. Om overmatige afkoeling van de grond te voorkomen, moet het onttrekkingsdebiet per persoon onder 12 kWh/d blijven. Als we overschakelen op bodemwarmtepompen, moeten we rekening houden met een aanzienlijke warmteaanvul-

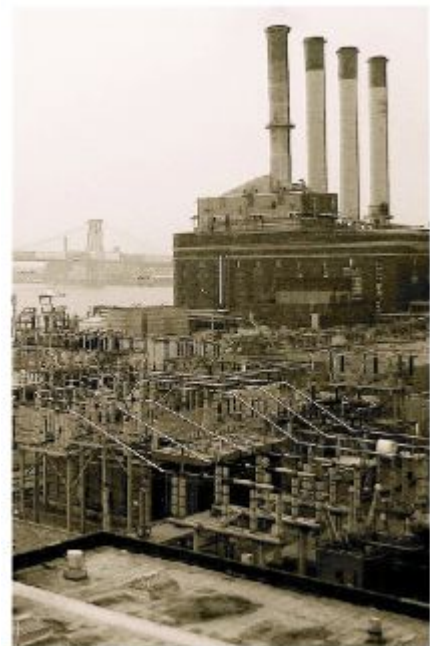
Oppervlakte per persoon (m ²)	
Bangalore	37
Manhattan	39
Paris	40
Chelsea	66
Tokio	72
Moskau	97
Taipei	104
The Hague	152
San Francisco	156
Singapur	156
Cambridge MA	164
Sydney	174
Portsmouth	213

Tabel 21.13: Enkele stedelijke gebieden per persoon

een aanzienlijke warmteaanvul-

ling in de zomer, zodat er voldoende warmte in de grond beschikbaar is voor de volgende winter. Voor deze aanvulling kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van afvalwarmte van airconditioners of van warmte afkomstig van zonnepanelen op daken. (Zonnewarmte uit de zomer wordt bijvoorbeeld in de Drake Landing Solar Community in Canada [www-dlsc.ca] in de grond opgeslagen voor de volgende winter). Als alternatief moeten we ervan uitgaan dat we daarnaast luchtwarmtepompen moeten gebruiken, en dat we dan in staat moeten zijn om met warmtepompen alle warmte op te wekken die we nodig hebben - zolang we maar genoeg elektriciteit hebben om die warmte op te pompen. In Engeland dalen de temperaturen niet erg ver onder het vriespunt, zodat de bezorgdheid over slechte prestaties van luchtwarmtepompen in de winter, die in Noord-Amerika en Scandinavië misschien wel terecht is, in Engeland waarschijnlijk niet hoeft te bestaan.

Mijn conclusie: kunnen we het energieverbruik voor verwarming verminderen? Ja. Kunnen we tegelijkertijd fossiele brandstoffen uitbannen? Ja. We zouden al onze verwarming met fossiele brandstoffen moeten vervangen door elektrische warmtepompen, en daarbij het laaghangende fruit niet vergeten - isolatie van gebouwen en trucjes met de thermostaat - en we kunnen de benodigde energie terugbrengen tot 25% van ons huidige niveau. Zelfs als de extra benodigde elektriciteit afkomstig zou zijn van gasgestookte elektriciteitscentrales, zou dat nog steeds een veel efficiëntere manier van verwarmen zijn dan we momenteel doen door gewoon gas te verbranden. Warmtepompen zijn toekomstbestendig omdat ze ons in staat stellen gebouwen efficiënt te verwarmen met elektriciteit uit eender welke bron.

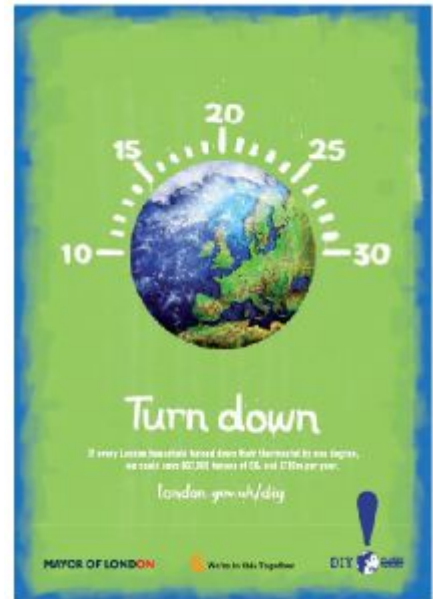


[171] De tegenstanders beweren dat de rendementscijfers van luchtwarmtepompen belabberd zijn, slechts 2 of 3. Maar hun informatie is verouderd. Als we gewoon moderne warmtepompen kopen, kunnen we het veel beter doen. De Japanse regering heeft voor tien jaar wettelijke stimuleringsprogramma's voor efficiëntie opgezet, waardoor de prestaties van airconditioners enorm zijn verbeterd; dankzij deze stimuleringsmaatregelen zijn er nu luchtwarmtepompen met een prestatiecoëfficiënt van 4,9; deze warmtepompen kunnen zowel warm water als warme lucht produceren.

Een ander argument tegen warmtepompen is "Oh, we kunnen mensen geen efficiënte luchtwarmtepompen laten hebben omdat ze die in de zomer zullen misbruiken voor airconditioning!" Alstublieft - ik heb net zo'n hekel aan overmatige airconditioning als ieder ander, maar deze warmtepompen zijn in de winter vier keer zo effi-

ciënt als welke andere verwarmingsmethode dan ook! Toon me een beter alternatief. Houtpellets? Zeker, een paar hout verzamelaars kunnen hout verbranden. Maar er is niet genoeg hout als iedereen het doet. Voor bosbewoners is er hout. Voor alle anderen zijn er warmtepompen.

Afb.21.14: Advertentie uit de Doe-het-zelf campagne Planet Repairs 2007 van de burgemeester van Londen. De tekst luidt: "Draai het terug! Als elk huishouden in Londen de thermostaat één graad lager zou zetten, zouden we samen 837.000 ton CO₂ en 110 miljoen pond per jaar kunnen besparen" [london-gov.uk/diy] In besparingen per persoon komt dat neer op 0,12 ton CO₂ per jaar per persoon. Dat is ongeveer 1% van de totale uitstoot per hoofd van de bevolking (11t), dus het is een goed advies. Ga door met het goede werk Ken! -



[Opmerkingen en referenties]

Pagina	
[160]	Isolatie van zolders en spouwmuren vermindert het warmteverlies van een typische oude woning met ongeveer 25%. – 142 Isolatie van zolders en spouwen vermindert het warmteverlies in een typisch oud huis met ongeveer een kwart. Eden en Bending (1985).
[161]	Toch bedroeg de gemiddelde wintertemperatuur in Engelse woningen in 1970 13°C. – 143 De gemiddelde binnentemperatuur in Britse huizen bedroeg in 1970 13°C! Bron: Dept. of Trade and Industry (2002a, par. 3.11)
[163]	dat Engeland nogal achterloopt op het gebied van stadsverwarming en WKK. – 145 Groot-Brittannië is nogal achtergebleven als het gaat om stadsverwarming en warmtekrachtkoppeling. Afvalwarmte van krachtcentrales in het VK zou kunnen voorzien in de verwarming van het hele land (Wood, 1985). In Denemarken leverden plaatselijke en stadsverwarmingssystemen in 1985 ongeveer 42% van de ruimteverwarming, waarbij warmte over een afstand van 20 km of meer werd overgedragen via stoomleidingen onder druk. In West-Duitsland ontvingen in 1985 vier miljoen gebouwen verwarmingsenergie uit stadsverwarming, met een gemiddeld vermogen van 7 kW per gebouw. Tweederde van de geleverde warmte was afkomstig van elektriciteitscentrales. In Vasteras, Zweden, werd in 1985 98% van de warmtebehoefte van de stad geleverd door elektriciteitscentrales.
[164]	Warmtepompen zijn ongeveer vier keer zo efficiënt als elektrische ovens – 147 Warmtepompen zijn ruwweg vier keer zo efficiënt als een standaard elektrisch vuur. Zie www-gshp.org.uk . Sommige van de in Engeland beschikbare warmtepompen hebben al een prestatiecoëfficiënt van meer dan 4,0 [yok2nw]. Er zijn alleen overheidssubsidies voor grondwaterwarmtepompen indien zij een prestatiecoëfficiënt hebben van meer dan 4,4 [2dtx8z]. Commerciële aardwarmtepompen zijn beschikbaar met prestatiecoëfficiënten van 5,4 voor koeling en 4,9 voor verwarming [2fd8ar]. [172]
[171]	luchtwarmtepompen met een prestatiecoëfficiënt van 4,9 – 153 Luchtwarmtepompen met een prestatiecoëfficiënt van 4,9. Volgens HPTCJ (2007) zijn er in Japan sinds 2006 warmtepompen beschikbaar met een prestatiecoëfficiënt van 6,6. De efficiëntie van warmtepompen in Japan is in tien jaar tijd verbeterd van 3 naar 6 dankzij subsidieprogramma's van de overheid. HPTCJ (2007) beschrijft een lucht/water-warmtepomp, Eco Cute genaamd, met een prestatiecoëfficiënt van 4,9. De Eco Cute werd in 2001 gelanceerd. www-ecosystemjapan.com .
	Verdere literatuur over warmtepompen ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/ , www-kensaengineering.com , www-heatking.co.uk , www-iceenergy.co.uk .

22 efficiënter

Efficiënt gebruik van elektriciteit

Efficiënt gebruik van elektriciteit

Kunnen we het elektriciteitsverbruik verminderen? Ja, het uitschakelen van elektrische apparaten wanneer ze niet in gebruik zijn, maakt een aanzienlijk verschil. Energie-efficiënte lampen besparen ook elektriciteit.

In [hoofdstuk 11](#) hebben wij reeds aandacht besteed aan elektrische apparaten. Sommigen van hen zijn onopvallend, anderen zijn verrassend machtsbelust. De laserprinter in mijn kantoor slurpt - zonder enig werk te verrichten - 17 W, bijna 0,5 kWh per dag! Een vriend kocht een lamp bij Ikea. De transformatoradapter (**Fig.22.1**) verbruikt 10W (0,25 kWh/d), ongeacht of de lamp uit of aan is. Neem een paar stereo's, dvd-spelers, kabelmodems en draadloze apparaten, en u zult zien dat de helft van uw elektriciteitsverbruik kan worden bespaard.



Fig.22.1: Een verschrikkelijke transformator adapter van een Ikea lamp, de adapter verbruikt bijna 10 W als de lamp uit is!

Volgens het Internationaal Energieagentschap is stand-by-vermogen goed voor ongeveer 8% van de binnenlandse vraag naar elektriciteit. In Engeland en Frankrijk bedraagt de gemiddelde stand-by ongeveer 0,75 kWh/d per huishouden. Het probleem is niet de standby-stroom zelf - het is de goedkope manier waarop deze wordt geïmplementeerd. Stand-by-systemen met minder dan 0,01 W zijn perfect haalbaar, maar fabrikanten die een cent op de fabricagekosten willen besparen, zaden de consument op met jaarlijkse kosten van enkele euro's.

Het Vampieren Jager Experiment

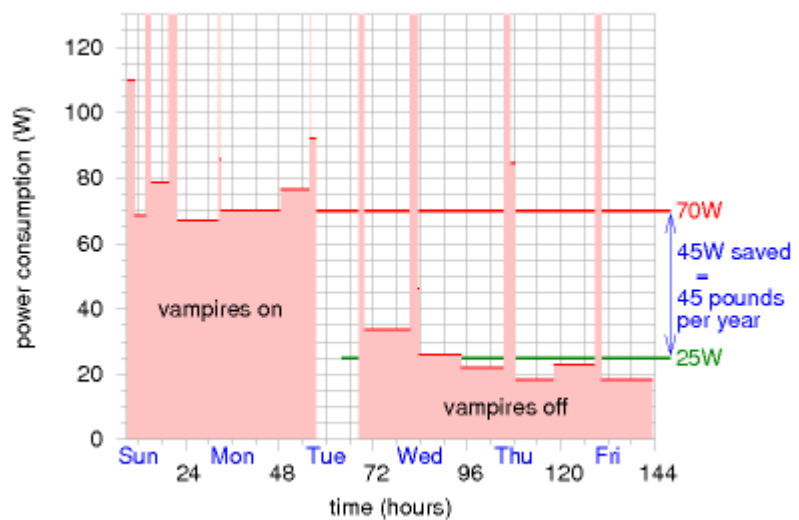
Fig.22.2 toont een experiment dat ik thuis heb gedaan. Eerst heb ik het elektriciteitsverbruik afgelezen van twee dagen dat ik niet thuis was of sliep. Toen heb ik alle elektrische apparaten die ik normaal aan liet staan, uitgezet en de meter nog drie dagen afgelezen. Het resultaat: het bespaarde vermogen was 45 W, wat neerkomt op 45 euro per jaar bij een elektriciteitsprijs van 11 cent per kWh.

Sinds ik regelmatig op mijn elektriciteitsmeter kijk, is mijn totale elektriciteitsverbruik gehalveerd (**Fig.22.3**). Ik heb van deze besparing een vaste gewoonte gemaakt door er een gewoonte van te maken mijn elektriciteitsmeter elke week af te

lezen om er zeker van te zijn dat de elektriciteitszuigende vampieren zijn uitgebannen. Als deze goocheltruc in alle huizen en op alle werkplekken zou worden herhaald, zou dat uiteraard tot enorme besparingen leiden.

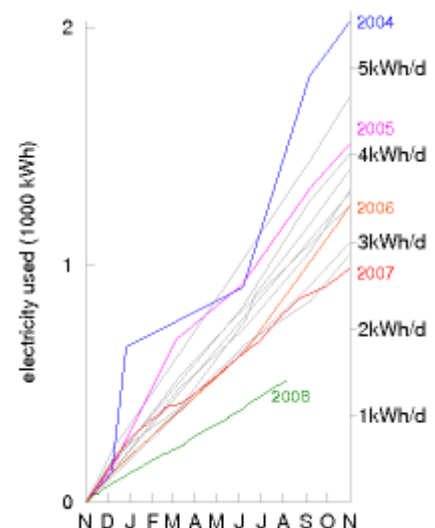
Fig.22.2: Rendement bij "uit".

Het meten van de bespaarde stroom door het uitschakelen van de vampieren in een week waarin ik het grootste deel van de tijd het huis uit was voor mijn werk, dus er was weinig zinvol stroomgebruik overdag of 's nachts, behalve voor de koelkast. De kleine hoge pieken werden veroorzaakt door de magnetron, de broodrooster, de wasmachine en de stofzuiger. Op dinsdag heb ik bijna al mijn vampieren uitgezet: twee stereo's, dvd-speler, modem, wifi-router, AB. De rode lijn toont het "niemand is thuis"-gemiddelde vóór de verandering, de groene lijn dat erna. De daling daartussen is 45 kW, of 1,1 kWh per dag.



[174] Daarom hebben enkele medewerkers van Cambridge de koppen bij elkaar gestoken en een website gelanceerd die het lezen van de elektriciteitsmeter leuk en informatief maakt. Deze site, ReadYourMeter.org, is bedoeld om mensen te helpen soortgelijke experimenten uit te voeren, de resultaten te interpreteren en zich goed te voelen over minder verbruik.

Fig.22.3: Mijn cumulatief huishoudelijk elektriciteitsverbruik, in kWh, jaarlijks van 1993 tot 2008. De grijze lijnen tonen de jaren 1993 tot 2003 (zonder afzonderlijke jaren voor de duidelijkheid). De gekleurde lijnen geven de jaren vanaf 2004 weer. De schaal aan de rechterkant toont het gemiddelde verbruik in kWh per dag. Het vampierexperiment vond plaats op 2 oktober 2007. Door de combinatie van het uitbannen van vampiers en het installeren van spaarlampen daalde mijn verbruik van 4 kWh/d tot 2 kWh/d.



Ik hoop dat dit soort gebruik van slimme meters een tastbare bijdrage levert. Voor de toekomst van mijn vereenvoudigd Engeland, 2050, ging ik er echter van uit dat al deze besparingen zouden worden gecompenseerd door het wonder van de groei. Groei is een doctrine van onze samenleving: mensen worden rijker, dus spelen ze

met meer elektronica. De behoefte aan steeds snellere en steeds betere computerspelletjes leidt noodzakelijkerwijs tot een hoger stroomverbruik van computers. De computers van het laatste decennium waren mooi genoeg, maar nu zijn ze nutteloos en moeten worden vervangen door snellere, hetere machines.

Opmerkingen en referenties

Pagina	
[173]	stand-by-energie draagt ongeveer 8% bij aan de binnenlandse vraag naar elektriciteit: Bron: Internationaal Energieagentschap (2001). Voor meer literatuur over stand-byvermogen zie: www-iea.org/textbase/subjectqueries/standby.asp .

23 duurzamer

Duurzame fossiele brandstoffen?

Het is een onontkoombare realiteit dat fossiele brandstoffen nog decennia lang een belangrijk deel van de energiemix zullen blijven uitmaken.

Woordvoerder van de Britse regering, april 2008

Onze huidige gelukkige progressieve toestand is een ding van beperkte duur.

William Stanley Jevons, 1865

In de laatste drie hoofdstukken hebben we gekeken naar de belangrijkste technologieën en veranderingen in levensstijl om het energieverbruik te verminderen. We hebben ontdekt dat we het transportgebruik kunnen halveren (en het gebruik van fossiele brandstoffen kunnen vermijden) door over te schakelen op elektrische voertuigen. We hebben ook ontdekt dat we het verwarmingsverbruik nog aanzienlijker kunnen verminderen (en ook fossiele brandstoffen kunnen vermijden) door alle woningen beter te isoleren en elektrische warmtepompen te gebruiken in plaats van fossiele brandstoffen. "Ja, dat kunnen we", we kunnen de consumptie verminderen. Maar het is een zeer grote uitdaging om in dit verminderde verbruik te voorzien met de eigen duurzame energiebronnen van Engeland (zie **fig.18.7**). Het is dus tijd om de niet-hernieuwbare opties voor de energievoorziening te bespreken. Laten we de bekende reserves van fossiele brandstoffen nemen, die voornamelijk uit steenkool bestaan: 1600 Gt steenkool. Laten we het gelijk verdelen over zes miljard mensen en het "duurzaam" verbranden. Maar wat betekent "duurzaam" in de context van eindige hulpbronnen? Hier is een arbitraire definitie die ik zal gebruiken: de mate van gebruik van een hulpbron is "duurzaam" als de hulpbron op die manier **1000 jaar** meegaat. Eén ton steenkool levert 8000 kWh aan chemische energie, dus 1600 Gt steenkool verdeeld over 6 miljard mensen gedurende 1000 jaar levert **6 kWh per dag per persoon** op. Een conventionele kolen-gestookte elektriciteitscentrale zet deze chemische energie om in elektrische energie met een rendement van 37% - dat betekent **2,2 kWh(el) per dag per persoon**.



Afb.23.1: Kolenvoorziening voor Kingsnorth Power Station (vermogen 1940 MW) in 2005. foto door Ian Boyle www-simplonpc.co.uk

Fig.23.2: "Duurzame fossiele brandstoffen".

Coal: 6 kWh/d

Als we echter om het klimaat geven, willen we misschien geen conventionele elektriciteitscentrales gebruiken. In plaats daarvan zouden we waarschijnlijk de voorkeur geven aan "schone steenkool"-technologie, ook bekend als CCS of "kolengestookte elektriciteitsopwekking met koolstofafvang en -opslag" - een momenteel weinig gebruikte technologie waarbij het grootste deel van de kooldioxide uit schoorsteengassen wordt opgevangen en in een gat in de grond geschept. Het op deze manier zuiveren van de emissies van elektriciteitscentrales vergt aanzienlijke energiekosten - de elektriciteitsproductie wordt met ongeveer 25% verminderd. Een "duurzaam" gebruik van de bekende steenkoolreserves, indien CO₂-neutraal, levert dus slechts 1,6 kWh(el) per dag per persoon op.

We kunnen dit "duurzame" steenkoolverbruik - 1,6 Gt per jaar - nu vergelijken met het huidige mondiale steenkoolverbruik: 6,3 Gt per jaar met een opwaartse trend.

Hoe ziet het eruit als we alleen naar Engeland kijken? De Britse steenkoolreserves worden geraamd op 7 Gt. OK, als we die 7 Gt verdelen over 60 miljoen mensen, krijgen we 100 ton per persoon. [176] Als we streven naar onze oplossing van 100 jaar, levert dat **2,5 kWh per dag per persoon op**. In een kolencentrale met koolstofafvang en -opslag levert deze "duurzame" benadering van steenkool in het VK ons 0,7 kWh(el) per dag per persoon op.

Onze conclusie is dan ook duidelijk:

Schone steenkool is slechts een tussenoplossing:

Terwijl we vooruitgang boeken met schone steenkooltechnologie om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen, moeten we, terwijl we onszelf schouderklopjes geven, zorgvuldig en nauwkeurig gegevens bijhouden. Bij de verbranding van steenkool komen niet alleen in de elektriciteitscentrale, maar ook in de steenkoolmijn broeikasgassen vrij. Bij de kolenwinning komen vooral methaan, koolmonoxide en kooldioxide vrij, zowel rechtstreeks uit de kolenlagen wanneer deze worden geopend, als verder stroomafwaarts uit de ontgonnen leisteen en klei; in een conventionele kolengestookte elektriciteitscentrale maken deze mijngassen slechts 2% uit van de totale koolstofvoetafdruk, maar in "schone kolen"-elektriciteitscentrales kunnen deze percentages aanzienlijk zijn. Er is een vergelijkbaar boekhoudkundig probleem met aardgas: als - laten we zeggen - 5% van het aardgas ontsnapt door lek-



Fig.23.3: Een rups grazend in oude bladeren. Foto door Peter Gunn

ken op weg van de bron naar de elektriciteitscentrale, dan is deze methaanvervuiling equivalent (in termen van broeikaseffect) met een toename van 40% in kooldioxide-emissies in de elektriciteitscentrale.

Nieuwe kolentechnologieën

Het in Stanford gevestigde directcarbon.com ontwikkelt de Direct Carbon Fuel Cell, een brandstofcel die brandstof en lucht rechtstreeks omzet in elektriciteit en CO₂ zonder gebruik te maken van water- of stoomturbines. Zij beweren dat dit type kolengestookte elektriciteitsopwekking tweemaal zo efficiënt zou zijn als conventionele elektriciteitscentraletechnologie.

Wanneer is het einde van "business as usual"?

De econoom Jevons maakte een eenvoudige berekening in 1865. In die tijd werd er gediscussieerd over hoe lang de Britse kolen het zouden uithouden. De mensen beantwoordden de vraag gewoonlijk door de geschatte resterende steenkoolreserves te delen door de mate van verbruik, en kregen antwoorden als "1000 jaar". Maar Jevons stelde dat de consumptie niet constant was. Het was elke 20 jaar verdubbeld en "vooruitgang" zou ervoor zorgen dat het zo zou blijven. Dus "steenkoolreserves naar verbruikspercentage" leidt tot verkeerde antwoorden.

In plaats daarvan extrapoleerde Jevons een exponentieel toenemend verbruik en berekende hij de tijd totdat het gecumuleerde totaal daarvan de geraamde reserves overschreed. Dit leverde een veel kortere periode op. Jevons ging er niet van uit dat de consumptie daadwerkelijk in hetzelfde tempo toenam, hij stelde alleen vast dat de toename niet kon worden volgehouden. Zijn berekening schatte voor Britse lezers de onvermijdelijke grenzen aan de groei en de korte tijd voordat die grenzen voelbaar zouden worden. Jevons voorspelde dat het einde van de Britse "vooruitgang" binnen 100 jaar na 1865 zou komen. Jevons had gelijk. De Britse steenkoolproductie bereikte haar hoogtepunt in 1910, en tegen 1965 was Engeland niet langer een wereldmacht.

[177] Laten we deze berekening herhalen voor de wereld als geheel. In 2006 bedroeg het steenkoolverbruik 6,3 Gt per jaar. In vergelijking met de 1600 Gt aan resterende reserves zegt men vaak "er is steenkool voor nog eens 250 jaar". Maar als we aannemen dat "business as usual" een toenemende consumptie inhoudt, krijgen we een ander antwoord. Indien het stijgingspercentage van het steenkoolverbruik 2% per jaar blijft (dit is een redelijk gemiddelde van de gegevens van 1930 tot 2000), dan zou in 2096 alle steenkool verbruikt zijn. Als het groeipcentage 3,4% bedraagt (het gemiddelde van de laatste tien jaar), dan zou het einde van "business as usual" vóór 2072 komen. Geen 250 jaar, maar 60!

Als Jevons vandaag nog zou leven, zou hij ongetwijfeld overtuigend voorspellen

dat we rond 2050 of 2060 aan het eind van onze gelukkige progressieve omstandigheden zouden zijn, tenzij we een nieuwe koers zouden uitzetten, weg van business as usual.



Opmerkingen en referenties

Pagina	
[175]	Een arbitraire definitie van "duurzaam" - 1000 jaar 157 1000 jaar - mijn arbitraire definitie van "duurzaam". Als voorloper op een dergelijke keuze hebben Hansen et al. (2007) "meer dan 500 jaar" gelijkgesteld met "voor altijd".
[175]	Een ton steenkool levert 8000 kWh aan chemische energie - 1 ton steenkoolequivalent = 29,3GJ = 8000 kWh chemische energie. In dit cijfer zijn de energiekosten voor mijnbouw, vervoer en koolstofvastlegging niet inbegrepen.
[175]	"Kolengestookte elektriciteitsopwekking met CO₂-afvang en -opslag" - Koolstofafvang en -opslag (CCS). Er zijn verschillende CCS -technologieën. Eén daarvan is de CO ₂ uit de uitlaatgassen te filteren; een andere is de steenkool te vergassen en de CO ₂ vóór de verbranding af te scheiden. Zie Metz et al. (2005). Het eerste prototype van een kolengestookte centrale met CCS is op 9 september 2008 geopend door het Zweedse bedrijf Vattenfall [5kpjk8].
[175]	De Britse steenkoolreserves worden geraamd op 7 Gt - UK coal. In december 2005 werden de reserves en hulpbronnen in bestaande mijnen op 350 miljoen ton geraamd. In november 2005 werden de potentiële bovengrondse reserves geraamd op 620 miljoen ton; en het ondergrondse kolenvergassingspotentieel op ten minste 7 miljard ton. [yebuk8]
[176]	komen ook broeikasgassen vrij in de kolenmijn... – 158 Bij de winning van steenkool komen broeikasgassen vrij. Voor informatie over het vrijkomen van methaan bij steenkoolwinning zie www.epa.gov/cmop/ , Jackson en Kershaw (1996), Thakur et al. (1996). Wereldwijd bedraagt de methaanuitstoot door steenkoolwinning ongeveer 400 Mt CO ₂ e per jaar. Dit vertegenwoordigt ongeveer 2% van de broeikasgasemissies van steenkoolverbranding. Het gemiddelde methaangehalte van Engelse kolenlagen bedraagt 4,7 m ³ [178] per ton kolen (Jackson en Kershaw, 1996); dit methaan heeft, indien het in de atmosfeer vrijkomt, een aardopwarmingspotentieel van ongeveer 5% van dat wat door de verbranding van kolen wordt veroorzaakt.
[176]	als 5% van het aardgas ontsnapt door lekken – 158 Als 5% van het aardgas lekt, komt dat neer op een verhoging van de kooldioxide-uitstoot met 40%. Vervuiling door methaanlekken heeft een opwarmend effect dat ongeveer 8 keer zo groot is als de CO ₂ die vrijkomt bij de verbranding van methaan; Aucthmal, niet de standaard "23 keer", want "23 keer" is de opwarmingsverhouding van gelijke massa's methaan en CO ₂ . Elke ton CH ₄ verandert in 2,75 ton CO ₂ bij verbranding; als het ontsnapt, is dat gelijk aan 23 ton CO ₂ . En 23/2.75 is 8.4.
	Verder lezen: World Energy Council [yhxf8b]
	Verdere lectuur over ondergrondse steenkoolvergassing: [e2m9n]

24 kernenergie

Kernenergie

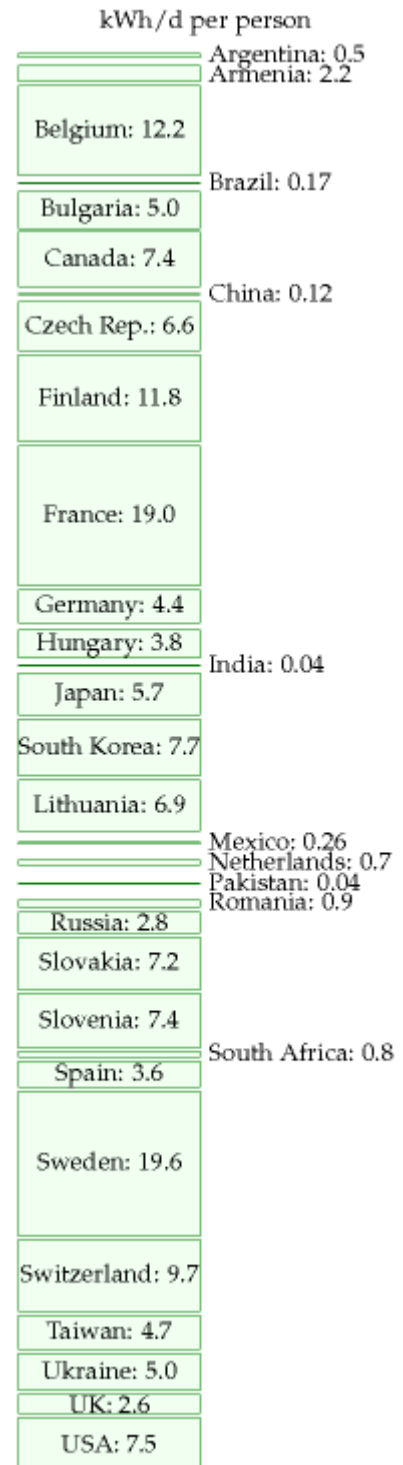
We hebben de fout gemaakt om kernenergie op één lijn te stellen met kernwapens, alsof alles wat kernenergie is, slecht is. Ik denk dat dat net zo'n grote vergissing is als nucleaire geneeskunde over een kam scheren met kernwapens.

Patrick Moore, voormalig directeur van Greenpeace International.

Kernenergie is er in twee smaken. Kernsplijting is de vorm die wij kennen en gebruiken in onze elektriciteitscentrales; bij kernsplijting wordt uranium als brandstof gebruikt, een bijzonder zwaar element. Kernfusie is de andere, waarvan we nog niet weten hoe ze in krachtcentrales kan worden toegepast; bij kernfusie zouden lichte elementen als brandstof worden gebruikt, met name waterstof. Splijtingsreacties splitsen een zware kern in twee middelzware kernen, waarbij energie vrijkomt. Bij fusiereacties smelten twee lichte kernen samen tot één middelgrote, waarbij energie vrijkomt.

Beide vormen van kernenergie, kernsplijting en kernfusie, hebben één belangrijk kenmerk: de kernenergie die per atoom beschikbaar is, is bijna een miljoen maal groter dan de chemische energie in een atoom van typische brandstoffen. Dit betekent dat de hoeveelheid brandstof en afval die je in een kernreactor moet verwerken tot een miljoen keer kleiner kan zijn dan de hoeveelheid brandstof en afval die een vergelijkbare conventionele elektriciteitscentrale produceert.

Fig.24.1: Elektriciteit uit kernsplijting in 2007 per hoofd van de bevolking, in kWh per dag per persoon, in elk land met kerncentrales.



Laat me dit idee persoonlijk maken. De massa fossiele brandstoffen die door de gemiddelde Brit wordt verbruikt, bedraagt ongeveer 16 kg per dag (4 kg steenkool, 4 kg aardolie en 8 kg gas). Dat betekent dat elke dag, alleen al door jou, een hoeveelheid fossiele brandstof die overeenkomt met de inhoud van anderhalf bierkratje, uit een gat in de grond wordt gehaald, getransporteerd, verwerkt en ergens verbrand. Het verbruik van fossiele brandstoffen door de gemiddelde Brit veroorzaakt 11 ton afvalkooldioxide per jaar, dat is 30 kg per dag. Stel je voor dat iedereen verantwoordelijk was voor het verzamelen en recyclen van zijn eigen kooldioxide-afval. 30 kg zou elke dag een uitpuilende rugzak vol zijn, gelijk aan de inhoud van drie kratten bier!

Ter vergelijking: de hoeveelheid natuurlijk uranium die nodig is om dezelfde hoeveelheid energie te produceren als die 16 kg fossiele brandstoffen in een gewone kerncentrale bedraagt slechts 2 gram; en het resulterende afval weegt een kwart gram. (Die 2 gram uranium is overigens niet zo weinig als een miljoenste van 16 kg per dag, want de huidige reactoren verbranden minder dan 1% van het uranium). Om 2 g uranium per dag te leveren, moeten mijnwerkers in uraniummijnen ongeveer 200 g erts per dag winnen.

[180] De stromen van materiaal in en uit een kernreactor zijn klein in vergelijking met de stromen van fossiele brandstoffen. "Klein is mooi", klein is mooi, maar het feit dat de nucleaire afvalstroom klein is, betekent niet dat het geen probleem is; het is gewoon een "vrij klein" probleem.

"Duurzame" energie uit kernsplitsing

Fig.24.1 toont hoeveel elektriciteit in 2007 wereldwijd werd opgewekt met kern-energie, uitgesplitst per land.

Kan kernenergie "duurzaam" zijn? Laten we even de gebruikelijke vragen over veiligheid en opberging vergeten en ons afvragen of de mensheid generaties lang van kernsplijting kan leven. Hoe groot zijn de wereldreserves uranium of ander splijtbaar materiaal? Profiteren we slechts enkele decennia van uranium, of millennia lang?

Om de "duurzame" productie van uranium te schatten, neem ik al het ontginbare uranium in de aarde en het zeewater, verdeel het eerlijk onder de 6 miljard mensen, en vraag: "Hoe snel mogen we het opgebruiken als het 1000 jaar mee moet gaan?"

Bijna al het ontginbare uranium bevindt zich in de oceaan, niet op aarde: zeewater bevat 3,3 mg uranium per m³ water, wat wereldwijd neerkomt op 4,5 miljard ton. Ik noemde het uranium in de oceanen "afbreekbaar", maar dat is een beetje onnauwkeurig - het meeste oceaanwater is vrijwel ontoegankelijk, en de oceanische con-

vectiegordel draait maar eens in de 100 jaar rond of zo; en niemand heeft nog aangetoond dat uranium op industriële schaal uit zeewater kan worden gewonnen. Ik maak dus aparte ramingen voor twee gevallen: Ten eerste wanneer alleen uraniumerts wordt gebruikt, en ten tweede wanneer oceanisch uranium wordt toegevoegd.

Tabel.24.2: *Bekende ontginbare uranium-reserves. Hierboven zijn de "afdoende bezwezen" en de "uitgestelde" voorraden vermeld, tegen een kostprijs van minder dan \$ 130 per kg uraan, per 1/1/2005. Dit zijn de geraamde voorraden in gebieden waar reeds exploratie heeft plaatsgevonden. Er ligt ook nog 1,3 miljoen ton verarmd uranium in voorraden, als bijproduct van vroegere uraniumactiviteiten.*

Miljoen ton uranium	
Australië	1,14
Kazachstan	0,82
Canada	0,44
VS	0,34
Zuid-Afrika	0,34
Namibië	0,28
Brazilië	0,28
Russische Federatie	0,17
Oezbekistan	0,12
Wereldtotaal reserves in de grond)	4,7
Fosfaatreserves	22
Zeewater	4 500

Uraniumerts in de grond, dat kan worden gewonnen tegen een kostprijs van minder dan 130 dollar per kg, is slechts ongeveer een duizendste daarvan. Wanneer de prijs boven 130 dollar per kg stijgt, worden de fosfaatvoorraden, die uranium in kleine concentraties bevatten, rendabel. Het winnen van uranium uit fosfaten is eenvoudig en werd tot 1998 in Amerika en België gedaan. Voor mijn raming van het uraniumerts tel ik het conventionele uranium en de fosfaten bij elkaar op, en kom ik uit op een totale voorraad van 27 miljoen ton uranium (**Tabel.24.2**).

[181] We moeten twee soorten uraniumgebruik in de reactor onderscheiden: a) de veel gebruikte "once-through"-methode ^{Q26} haalt de energie hoofdzakelijk uit ²³⁵U (dat slechts 0,7% van het natuurlijk uranium uitmaakt) en werpt de resterende ²³⁸U af; b) snelle kweekreactoren, die duurder zijn om te bouwen, zetten de ²³⁸U om in splijtbaar plutonium ²³⁹Pu, waarbij ongeveer 60 maal meer energie uit het uranium wordt gehaald.

Eenmalige reactoren die uranium uit de grond gebruiken

Een kerncentrale met een capaciteit van 1 gigawatt heeft 162 ton uraan per jaar nodig. De bekende winbare voorraden, verdeeld over 6 miljard mensen, zouden 1000 jaar meegaan als we nucleaire elektriciteit zouden produceren met een snelheid van

26) ^{Q26} Once-through, letterlijk "eenmaal door", staat hier voor de klassieke kernreactortechnologie, waarbij splijtbaar materiaal (zo nodig na verrijking) eenmaal als splijstof wordt gebruikt en vervolgens voor verwijdering wordt verzonden.

0,55 kWh per dag per persoon. Dit "duurzame" productietempo komt overeen met de productie van slechts 136 kerncentrales, de helft van de huidige productie. Het is zeer waarschijnlijk dat hiermee het uraniumpotentieel wordt onderschat, want zolang er geen uranumschaarste is, is er geen behoefte aan grootschalige exploratie, en sinds de jaren tachtig is er weinig nieuwe exploratie gedaan, zodat er misschien meer uranium zal worden ontdekt. In een artikel dat in 1980 werd gepubliceerd, werden de voorraden van laagwaardig uranium op ongeveer 1000 maal hoger geraamd dan de door ons veronderstelde 27 miljoen ton.



Fig.24.3: (linksboven) Arbeiders duwen uraniumstaven in de X-10 grafiet-reactor.

Fig.24.4: (rechtsboven) Kerncentrale Three Mile Island.



Fig.24.5: (links) Dounreay Nuclear Power Development Establishment, waarvan de hoofdtak de ontwikkeling van snelle kweekreactortechnologie was. Foto door John Mullen.

Zou onze huidige eenmalige aanpak van uraniumontginning duurzaam kunnen zijn? Het is moeilijk te zeggen omdat de onzekerheden over toekomstige exploratie zo groot zijn. Met het huidige verbruik kunnen "once through"-reactoren zeker honderden jaren werken. [182] Maar als we kernenergie wereldwijd 40-voudig willen uitbreiden en gebruiken om fossiele brandstoffen te vervangen en een verdere groei van de levensstandaard te verzekeren, dan vreest men dat de "once through reactor"-technologie niet "duurzaam" is.

Snelle kweekreactoren die uranium uit de grond gebruiken

Uranium kan 60 keer efficiënter worden gebruikt in snelle kweekreactoren die alle uranium verbranden - zowel ^{238}U als ^{235}U (in tegenstelling tot "once-through"-reactoren die bijna alleen ^{235}U verbranden). Ook kan de verbruikte splijtstof die Once-Through-reactoren achterlaten, het verarmde uranium, worden gebruikt in snelle

kweekreactoren, zodat uranium dat al in Once-Through-reactoren is gebruikt, geen afval hoeft te zijn. Als we al het uranium in de grond (plus de restjes verarmd uranium) zouden verwerken in snelle kweekreactoren die 60 keer efficiënter zijn, zou dat **33 kWh per dag per persoon** zijn. De houding ten opzichte van de snelle kweekinstallaties varieert van "dit is een gevaarlijke mislukte experimentele technologie waar helemaal niet over mag worden gesproken" tot "we kunnen en moeten onmiddellijk beginnen met de bouw van snelle kweekinstallaties". Ik ben niet bevoegd om de risico's van snelle *fokkers* in te schatten en ik wil ethische verklaringen niet vermengen met feitelijke verklaringen. Mijn doel is alleen om te helpen bij het begrijpen van de cijfers. De enige ethische verklaring die ik hier wil afleggen is: "We moeten een concept hebben dat werkt." ^{Q2727}

Eenmalig, met uranium uit de oceanen.

Het uranium in de oceanen, als het er volledig uitgehaald zou worden en verwerkt in OnceThrough reactoren, is gelijk aan een totale energie van

$$\frac{4,5 \text{ miljard ton (in oceanen)}}{162 \text{ ton uranium (GW-jaar)}} = 28 \text{ miljoen GW-jaar}$$

Hoe snel kan uranium uit de oceanen worden gehaald? De oceanen circuleren traag: de helft van het water bevindt zich in de Stille Oceaan, en water uit de diepten van de Stille Oceaan circuleert slechts ongeveer om de 1600 jaar naar de oppervlakte door de grote oceanische convectie. Laten we aannemen dat 10% van het uranium in zo'n 1600 jaar kan worden gewonnen. Dat zou een winning van 280.000 ton per jaar betekenen. In eenmalige reactoren leverde dat een vermogen op van

$$2,8 \text{ miljoen GW-jaar} / 1600 \text{ jaar} = 1750 \text{ GW},$$

wat, verdeeld over 6 miljard mensen, neerkomt op **7 kWh per dag per persoon** (momenteel is er 369 GW aan kernenergiecapaciteit in de wereld, dus dit cijfer komt neer op een verviervoudiging van het huidige niveau). Ik concludeer dus dat de winning van uranium uit de oceanen van "once-through reactors" een "duurzame" optie zou maken - ervan uitgaande dat deze reactors de energiekosten van het winningsproces kunnen dekken.

Snelle kweekreactoren die gebruik maken van uranium uit de oceanen

Omdat "snelle kweekreactoren" 60 keer efficiënter zijn, zou dezelfde winning van uranium uit de oceanen **420 kWh per dag per persoon** kunnen opleveren. Last but not least, een duurzaam scenario dat het huidige verbruik overtreft! - maar alleen met behulp van twee technologieën, de ene nauwelijks ontwikkeld, de andere uit de

27) ^{Q27} "dat werkt" betekent hier, zoals in het volgende, dat iets zin heeft, redelijk en consistent is, samenhangend, zonder tegenspraak

mode: winning van oceanisch uranium, en snelle kweekreactoren.

183] Uranium uit rivieren

Het uraniumgehalte van de oceanen wordt overtroffen door dat van de rivieren, die uranium vervoeren met een snelheid van 32.000 ton per jaar. Als 10% van deze instroom wordt onderschept, zou dat genoeg brandstof zijn voor 20 GW "once-through"-reactoren of 1200 GW snelle kweekreactoren. De snelle kweekreactoren zouden dan **5 kWh per dag per persoon** leveren.

Al deze cijfers zijn samengevat in Fig.24.6.

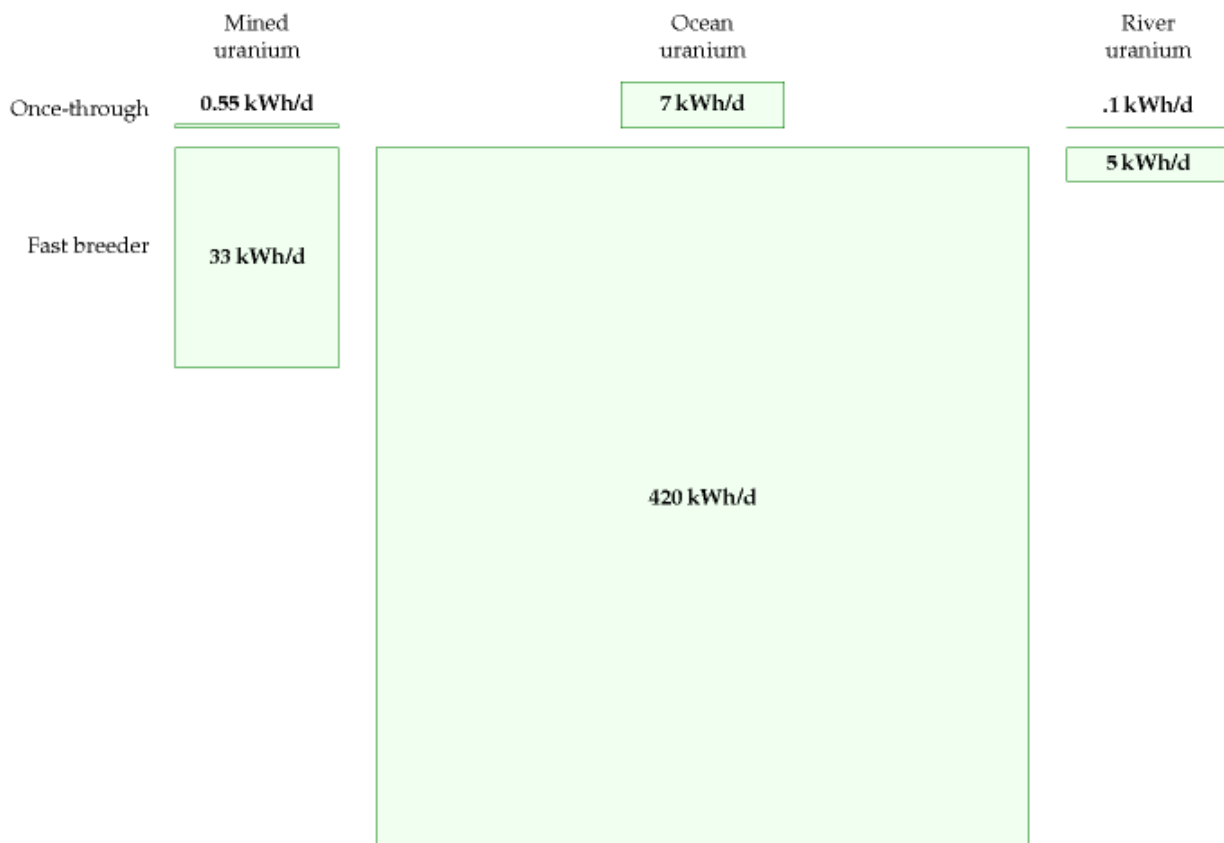


Fig.24.6: "Duurzame" energie uit uranium. Ter vergelijking: de huidige wereldproductie van kernenergie bedraagt 1,2 kWh/d per persoon. De kernenergieproductie in het VK is 4 kWh/d per persoon, en daalt.

Hoe zit het met de kosten?

Zoals gebruikelijk in dit boek wordt in de hoofdberekeningen weinig aandacht besteed aan de economie. Maar omdat deze potentiële bijdrage van elektriciteitsproductie op basis van oceanisch uranium een van de grootste is op onze lijst van "duurzame" productie, lijkt het aangewezen om na te gaan of dit uraniumenergiescenario economisch gezien wel aannemelijk is.

Japanse onderzoekers hebben een manier gevonden om uranium uit zeewater te

winnen voor ongeveer 100-300 dollar per kilogram, vergeleken met een kostprijs van ongeveer 20 dollar/kg voor uraniumerts. Omdat uranium zoveel meer energie per ton bevat dan traditionele brandstoffen, zou deze 5- of 15-voudige stijging van de kosten van uranium weinig effect hebben op de kosten van kernenergie: de kosten van kernenergie worden gedomineerd door de kosten van het bouwen en ontmantelen van kerncentrales, niet door de kosten van de brandstof. Zelfs een prijs van 300 dollar/kg zou slechts ongeveer 0,3 cent per kWh doorwerken in de elektriciteitsprijs. De kosten voor de winning van uranium uit zeewater zouden kunnen worden verlaagd door de winning te combineren met een ander gebruik van het zeewater - bijvoorbeeld de koeling van krachtcentrales.

184] We zijn er nog niet: Kan Japanse technologie worden opgeschaald? Wat zijn de energiekosten van de verwerking van zeewater? In het geciteerde Japanse experiment werd in drie kooien vol met 350 kg uranium-aantrekkend adsorptiemateriaal "meer dan 1 kg gele koek in 240 dagen" verzameld, deze waarde komt overeen met 1,6 kg per jaar. De kooien hadden een doorsnede van 48 m². Om een éénmalige kerncentrale van 1 GW te laten draaien, hebben wij 160.000 kg per jaar nodig, een productiesnelheid die 100.000 maal hoger ligt dan bij het Japanse experiment. Als we de Japanse technologie voor passieve adsorptie van uranium uit zeewater gewoon zouden opschalen, zou onze kerncentrale van 1 GW adsorptiekooien nodig hebben met een verzameloppervlak van 4,8 vierkante km, die 350.000 ton adsorptiemateriaal bevatten - meer dan het gewicht van het staal in de reactor zelf. Om deze grote getallen in menselijke termen te zetten: Als uranium bijvoorbeeld 22 kWh per dag per persoon zou leveren, dan zouden 1 miljoen mensen een reactor kunnen delen en zou elk van hen 0,16 kg uranium per jaar nodig hebben. Elke persoon zou dus een tiende nodig hebben van het apparaat dat in het Japanse experiment werd gebruikt, dat 35 kg weegt en 5 m² per persoon bestrijkt. Voorstellen om dergelijke uraniumwinningsinstallaties te bouwen ligt dus in dezelfde orde van grootte als voorstellen van het soort "iedereen moet 10 vierkante meter zonnepanelen hebben" of "iedereen moet een auto van een ton en een bijbehorende parkeerplaats bezitten". Een grote investering, zeker, maar niet buiten redelijke schalen. En dat was de berekening voor eenmalige reactoren. Snelle kweekers zouden 60 keer minder uranium nodig hebben, wat voor de massa van de uraniumcollector dan 0,5 kg per persoon zou zijn.

Thorium

Thorium is een radioactief element dat lijkt op uranium. Vroeger werd het gebruikt om gloeikousjes te maken. Het is ongeveer drie keer meer aanwezig in de aardkorst dan uranium. Bodemmateriaal bevat gewoonlijk ongeveer 6 ppm (0,0006%) thorium en sommige mineralen bevatten 12% thoriumoxide. Thorium kan volledig worden verbrand in eenvoudige reactoren (in tegenstelling tot standaard uraanreactoren, die slechts ongeveer 1% van het natuurlijk uraan verbranden). Thorium wordt

gebruikt in kernreactoren in India. Als uraniumerts schaars wordt, zal thorium waarschijnlijk de dominante splijstof worden.

Land	Reserves (in 1000 ton)
Turkije	380
Australië	300
India	290
Noorwegen	170
USA 1	60
Canada	100
Zuid-Afrika	35
Brazilië	16
Andere landen	95
Wereld totaal	1.580

Tabel.24.7: (links) Bekende wereldvoorraden thorium in monaziet (economisch winbaar).

Fig.24.8: (rechts) Thorium-opties

Conventional reactor	Mined Thorium 4 kWh/d
"Energy amplifier"	24 kWh/d

Thoriumreactoren leveren 3,6 miljard kWh warmte per ton thorium, wat betekent dat een 1GW-reactor ongeveer 6 ton thorium per jaar nodig heeft als de generatoren 40% efficiënt zijn. De wereldreserves aan thorium worden geraamd op 6 miljoen ton, vier maal zoveel als de bekende reserves in **Tabel.24.7**. Net als bij uranium lijkt het aannemelijk dat de thoriumvoorraden worden onderschat omdat exploratie naar thorium tegenwoordig niet interessant wordt geacht. Als we er, net als bij uranium, van uitgaan dat de voorraden naar verwachting 1000 jaar meegaan en gelijk verdeeld zijn over 6 miljard mensen, vinden we dat een vermogen van 4 kWh/d per persoon "duurzaam" kan worden opgewekt.

[185] Een alternatieve zogenaamde versnellergestuurde kernreactor voor thorium, de "Rubbiatron" ^{Q2828}, die is bedacht door Nobelprijswinnaar Carlo Rubbia en zijn collega's, zou 6 miljoen ton thorium kunnen omzetten in 15.000 TWy energie, of 60 kWh/d per persoon gedurende 1000 jaar, volgens hun schatting. Met een 40% efficiënte omzetting in elektriciteit zou dat gedurende 1000 jaar 24 kWh/d per persoon opleveren. En het afval van de rubbiatron zou ook veel minder radioactief zijn. Er wordt beweerd dat te zijner tijd vele malen meer thorium economisch afbreekbaar zou zijn dan de huidige schatting van 6 miljoen ton. Als de veronderstellingen - 300 keer meer - kloppen, zouden het thorium en de rubbiatron gedurende 60.000 jaar 120 kWh/d per persoon garanderen.

Landverbruik

Stel dat Engeland besluit serieus werk te maken van het geleidelijk afschaffen van fossiele brandstoffen en veel nieuwe kerncentrales bouwt, ook al zijn die misschien niet "duurzaam". Als we genoeg kerncentrales bouwen om een aanzienlijke CO₂-re-

28) ^{Q28} Engl. "energie versterker"

ductie in vervoer en verwarming mogelijk te maken, passen deze kerncentrales dan allemaal in Engeland? Het cijfer dat we moeten kennen is het vermogen per oppervlakte van een NPP: ongeveer 1000 W/m^2 (**Fig.24.10**). Stel dat we per dag per persoon 22 kWh nucleaire elektriciteit opwekken - dat is ongeveer 55 GW (ruwweg de nucleaire capaciteit van Frankrijk) geleverd door 55 kerncentrales, die elk één vierkante kilometer land in beslag nemen.



Fig.24.9: De krachtcentrales bij Sizewell. Sizewell A, op de voorgrond, had een capaciteit van 420 MW en werd eind 2006 gesloten. Sizewell B, daarachter, heeft een capaciteit van 1,2 GW. Foto door William Connolley.



Fig.24.10: Sizewell beslaat minder dan 1 km^2 . De afstand van het blauwe rooster is 1 km. © Crown Copyright; Ordnance Survey

Dat is ongeveer 0,02% van het land. Windmolenparken die hetzelfde vermogen opwekken zouden ongeveer 500 keer meer land gebruiken: 10% van het land. Als de NPP's in paren langs de kust zouden worden geplaatst (lengte 3000 km bij een resolutie van 5 km), zou dat neerkomen op één paar per 100 km. Hoewel de totale oppervlakte bescheiden is, zou het aandeel van de kustlijn dat hierdoor zou worden opgevreten toch nog 2% bedragen (2 km per 100 km).

[186] De economische aspecten van ontmanteling

Wat kost het om een kerncentrale te ontmantelen? De Nuclear Decommissioning Authority heeft een jaarlijkse begroting van 2 miljard euro voor de komende 25 jaar. De nucleaire industrie verkoopt iedereen in Engeland al ongeveer 25 jaar 4 kWh/d, dus de kosten voor de Decommissioning Authority bedragen 2,3 cent/kWh^{Q29}. Dat is een aanzienlijke subsidie - maar lang niet zo aanzienlijk als de subsidie

29)^{Q29} De ontmantelingsautoriteit is niet alleen verantwoordelijk voor civiele nucleaire installaties, maar ook voor militaire. Het leeuwendeel van het budget gaat dus naar de ontmanteling

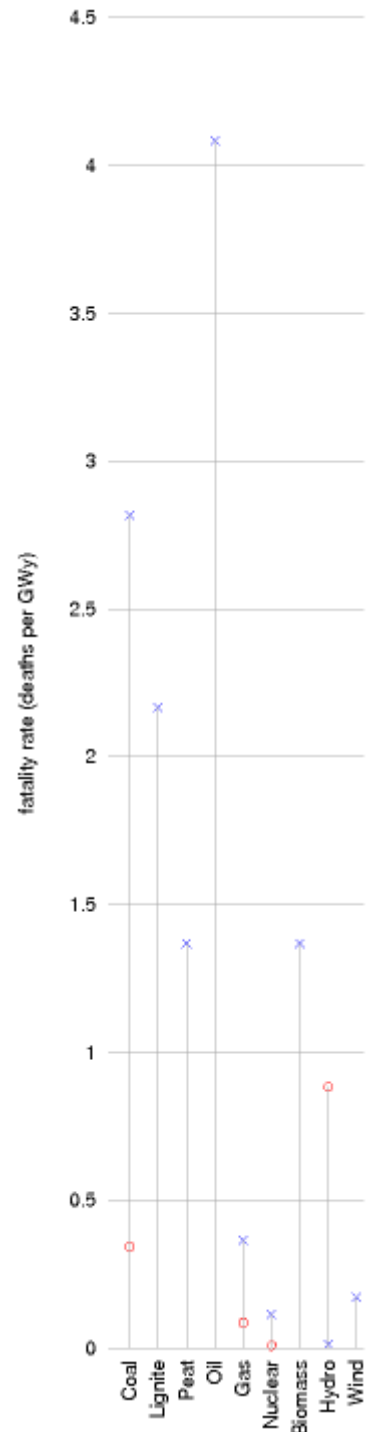
voor offshore-windenergie (7 cent/kWh), moet gezegd worden.

Veiligheid

De veiligheid van kerncentrales blijft een punt van zorg in Engeland. De THORP-opwerkingsfabriek in Sellafield, die in 1994 voor £ 1,8 miljard is gebouwd, had van augustus 2004 tot april 2005 een groeiend lek als gevolg van een gebroken pijp. In die acht maanden stroomde in totaal 85 000 liter uraniumhoudende vloeistof in een vat dat was uitgerust met veiligheidssystemen die waren ontworpen om lekken van 15 liter onmiddellijk op te sporen. Maar het lek bleef onopgemerkt omdat de exploitanten geen tests hadden uitgevoerd om te garanderen dat de veiligheidssystemen werkten; en omdat de exploitanten de veiligheidsalarmen gewoonlijk toch negeerden.

Het veiligheidssysteem kwam met een riem en bretels. Ongeacht de slecht werkende veiligheidsalarmen hadden routinemetingen van de vloeistoffen in de opvangbak uiterlijk een maand na het ontstaan van het lek een abnormale uraniumconcentratie moeten vaststellen; de exploitanten namen echter vaak niet de moeite om ook deze routinemetingen te verrichten omdat zij het te druk hadden; en toen zij de metingen verrichtten en een abnormale uraniumconcentratie in de opvangbak aantroffen (op 28 augustus 2004, 26 november 2004 en 24 februari 2005), werden aan deze vaststelling geen consequenties verbonden.

Fig.24.11: *Opofferingspercentages van elektriciteitsopwekking per technologie. X: schattingen van de Europese Unie in het kader van het ExternE-project, O: Paul Scherrer-instituut.*



In april 2005 was 22 ton uranium gelect, terwijl geen enkel lekdetectiesysteem een lek had ontdekt. Uiteindelijk werd het lek ontdekt door de boekhoudafdeling toen de bonentellers zich realiseerden dat zij 10% minder uranium eruit haalden dan hun

van militaire installaties, zodat deze 2,3 cent/kWh waarschijnlijk aanzienlijk overschat is (David MacKay, Errata).

klanten zeiden dat zij erin hadden gestopt! Godzijdank had dit privé-bedrijf een winst oogmerk, hè? De kritiek van de hoofdinspecteur voor nucleaire installaties was vernietigend: [187] "In de installatie heerste een cultuur van de andere kant opkijken en toestaan dat de instrumenten in de alarmmodus bleven werken in plaats van het alarm te onderzoeken en de daarmee samenhangende fout te verhelpen".

Als we particuliere bedrijven nieuwe reactoren laten bouwen, hoe kunnen we er dan voor zorgen dat er strengere veiligheidsnormen worden toegepast? Dat doe ik niet.

Anderzijds moeten wij ons niet te veel laten meeslepen door de angst voor de gevaren van kernenergie. Kernenergie is niet oneindig gevaarlijk. Het is gewoon gevaarlijk, net zoals kolenmijnen, olieplatforms, waterkrachtcentrales en windturbines gevaarlijk zijn.

Hoewel we geen garantie hebben tegen toekomstige nucleaire ongelukken, denk ik dat de juiste manier om kernenergie te evalueren is door haar objectief te vergelijken met andere energiebronnen.

Zo hebben kolengestookte elektriciteitscentrales het publiek blootgesteld aan radioactieve straling omdat kolenas gewoonlijk uranium bevat. Volgens een artikel in *Science Journal* worden mensen in Amerika blootgesteld aan hogere doses straling rond kolengestookte centrales dan rond kerncentrales.

Fig.24.12: *Tsjernobyl centrale (boven), de verlaten stad Prypiat opgericht om de centrale te ondersteunen (onder). Foto door Nik Stanbridge*



Als we de publieke risico's van verschillende energiebronnen kwantitatief willen beoordelen, hebben we een nieuwe eenheid nodig. Ik wil de eenheid "dodelijke slachtoffers per GWy (gigawattjaar)" introduceren. Laat me uitleggen wat het betekent als een energiebron een sterftecijfer heeft van 1 dode per GWy. Een gigawattjaar is de energie die wordt geproduceerd door een elektriciteitscentrale van 1 GW wanneer deze een jaar lang continu in bedrijf is. De elektriciteitsvraag van Engeland is ongeveer 45GW, of 45GWy per jaar zo u wilt. Dus als we onze elektriciteit halen uit een bron met 1 dode per GWy, zou dat betekenen dat het Britse elektrici-

teitssysteem 45 mensen per jaar doodt. Ter vergelijking: elk jaar sterven 3000 mensen op de Britse wegen. Dus zolang u geen campagne voert om de wegen af te schaffen, zult u toegeven dat "1 dode per GWy" een aantal slachtoffers is dat triest is om te zien, maar waar tevreden mee kan worden geleefd. Natuurlijk zou 0,1 doden per GWy te verkiezen zijn, maar je hoeft maar even na te denken om te beseffen dat fossiele brandstoffen helaas een hoger aantal slachtoffers moeten maken dan 0,1 doden per GWy - denk maar aan de ongelukken op booreilanden; helikopter-crashes in zee; branden in pijpleidingen; ontploffende raffinaderijen; ongelukken in steenkoolmijnen: er gebeuren in Engeland tientallen ongelukken per jaar rond de brandstofketen.

Laten we dus eens kijken naar de huidige ongeval-lencijfers van een reeks elektriciteitsbronnen. De offerpercentages verschillen sterk van land tot land. In China bijvoorbeeld is het aantal slachtoffers van steenkoolmijnen per ton gedolven steenkool ongeveer 50 maal zo hoog als in de meeste andere landen. **Fig.24.11** toont cijfers uit studies van het Paul Scherrer Institute (PSI) en een EU-project met de naam ExternE, waarin alle effecten van energieproductie uitvoerig zijn geëvalueerd. Volgens de cijfers van de EU hebben steenkool, bruinkool en olie de hoogste opofferingspercentages, gevolgd door turf en biomassa, met opofferingspercentages van meer dan 1 per GWy. Kernenergie en wind zijn de beste, met opofferingspercentages van minder dan 0,2 per GWy. Waterkracht is het veiligst volgens de EU-gegevens, maar het slechtst volgens de PSI-studie, omdat in laatstgenoemde studie een andere selectie van landen is onderzocht.



Inherente veiligheid van kernenergie

Onder druk van de bezorgdheid over kernongevallen hebben ingenieurs een groot aantal nieuwe reactoren ontworpen met verbeterde veiligheidskenmerken. Zo zou de GT-MHR-centrale inherent veilig zijn en ook een hoger rendement hebben bij de omzetting van warmte in elektriciteit dan conventionele kerncentrales [gt-mhr.ga.-com].

Mythen en legenden

Twee vaak genoemde nadelen van kernenergie zijn de bouwkosten en het afval. Laten wij een aantal aspecten hiervan nader belichten.

Voor de bouw van een kerncentrale zijn grote hoeveelheden beton en staal nodig, materialen waarvan de productie grote CO₂-verontreiniging met zich meebrengt.

Staal en beton van een kerncentrale van 1GW heeft een CO₂-voetafdruk van ongeveer 300.000 ton CO₂.

Spreading van dit grote aantal over de 25-jarige levensduur van de reactor en omrekening van de CO₂-bijdragen naar standardeenheden (g CO₂ per kWh(el)) geeft de

$$\text{CO}_2\text{-intensiteit van de bouwphase} = \frac{300 \times 109 \text{ g}}{10^6 \text{ kWh(el)} \times 220.000 \text{ h}} = 1,4 \text{ g/kWh(el)}$$

wat veel lager is dan de fossiele-brandstofwaarde van 400 g CO₂/kWh(el). Het IPCC schat dat de totale CO₂-intensiteit van een kerncentrale (inclusief bouw, brandstofverwerking en ontmanteling) minder dan 40 g CO₂/kWh(el) bedraagt (Sims et al. 2007).

Begrijp me niet verkeerd: ik probeer niet pro-nucleair te zijn. Ik ben gewoon pro-aritmetisch.

Is reactorafval niet een groot probleem?

Zoals we aan het begin van het hoofdstuk hebben opgemerkt, is de hoeveelheid geproduceerd afval relatief klein. Waar de as van tien kolencentrales een massa van vier miljoen ton per jaar bedraagt (met een volume van ongeveer 40 liter per persoon per jaar), omvat het kernafval van de tien kerncentrales van Engeland een volume van slechts 0,84 liter per persoon per jaar - denk aan één fles wijn per persoon per jaar (**fig.24.13**).

Het meeste hiervan is laag radioactief afval. 7% daarvan is middelradioactief afval en slechts 3% daarvan - 25 ml per jaar - is hoogradioactief afval.

Het hoogradioactieve afval is echt smerig spul. Het is gebruikelijk om het hoogactieve afval de eerste 40 jaar bij de reactor te laten. Het wordt opgeslagen in waterbassins en gekoeld. Na 40 jaar is de radioactiviteit gedaald tot 1/1000. De radioactiviteit blijft afnemen; als we het afval opwerken en plutonium en uranium scheiden voor verder gebruik als splijtstof, dan zal de activiteit van het hoogactief afval na 1000 jaar op het niveau van natuurlijk uraniumerts liggen. Dus hebben de ingenieurs van de opslagplaats een concept nodig om het afval voor de komende 1000 jaar veilig te stellen.

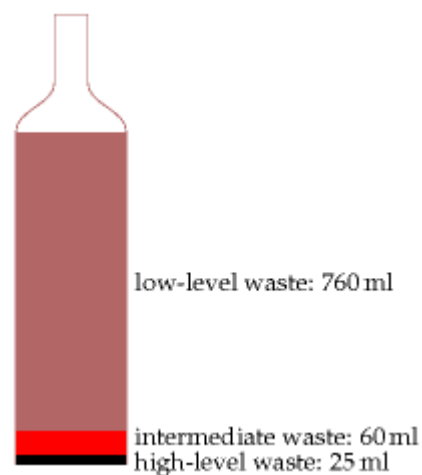


Fig.24.13: Het nucleaire afval van het VK heeft, per persoon, per jaar, een volume van iets meer dan een wijnfles vol.

Is dat een moeilijk probleem? 1000 jaar is zeker een lange tijd vergeleken met de

levensverwachting van regeringen en landen! Maar het volume is zo klein dat ik denk dat kernafval een van de kleinere problemen is, vergeleken met de andere soorten afval die we aan toekomstige generaties nalaten. Met 25 ml per jaar komt elke persoon in zijn hele leven op minder dan 2 liter hoogradioactief afval. Zelfs als we dat vermenigvuldigen met de 60 miljoen mensen, lijkt de hoeveelheid hoog-radioactief afval die gedurende een mensenleven wordt geaccumuleerd niet onhandelbaar groot: 105.000 kubieke meter. Dat is hetzelfde volume als 35 Olympische zwembaden. Als dit afval in een laag van een meter dik zou worden verspreid, zou het slechts een tiende van een vierkante kilometer in beslag nemen.

Er zijn al veel plaatsen die gesloten zijn voor mensen. Ik zou niet in jouw tuin mogen lopen. En jij ook niet in de mijne. Niemand van ons is welkom in Balmoral^{Q3030}. "Verboden toegang" borden staan overal. Downing Street, Heathrow Airport, kazernes, verlaten mijnen - alles is verboden terrein. Is het ondenkbaar om nog een vierkant van 1 km af te sluiten - misschien diep onder de grond - voor de komende 1000 jaar?

Vergelijk die 25 ml hoogradioactief afval per jaar per persoon eens met andere vormen van traditioneel afval die we momenteel dumpen: Huishoudelijk afval - 517 kg per jaar per persoon; gevaarlijk afval - 83 kg per jaar per persoon.

Soms wordt potentieel nieuw kernafval vergeleken met het kernafval waar we nu al mee te maken hebben, dankzij onze bestaande oude reactoren. Hier zijn de cijfers voor Engeland. Het verwachte volume van "hoogactief afval" tegen 2120, afkomstig van de ontmanteling van bestaande kerncentrales, bedraagt 478.000 m³. 2% van dit volume (ongeveer 10.000 m³) bestaat uit het hoogactieve afval (1.290 m³) en verbruikte splijtstof (8.150 m³), en omvat 92% van de activiteit. [190] Als we tien extra reactoren (10 GW) zouden bouwen, zouden deze nog eens 31.900 m³ verbruikte splijtstof toevoegen. Dat is hetzelfde volume als 10 zwembaden.

Als wij grote hoeveelheden energie halen uit kernsplitsing en -fusie, zou dat dan niet bijdragen tot de opwarming van de aarde, omdat al die extra energie vroeg of laat toch als warmte het milieu in gaat?

Dat is een grappige vraag. En omdat we in dit boek alles zorgvuldig in dezelfde eenheden hebben uitgedrukt, is het antwoord vrij gemakkelijk te geven. Laat ik eerst de belangrijkste cijfers van de mondiale energiebalans op blz. [021] nog eens samenvatten: De gemiddelde zonne-energie die door de atmosfeer, het land en het water wordt geabsorbeerd, bedraagt 238 W/m²; een verdubbeling van de CO₂-concentratie zou de netto opwarming effectief met 4 W/m² doen toenemen. Deze stijging met 1,7% wordt beschouwd als slecht nieuws voor het klimaat. Veranderingen

30) ^{Q30} de zomerresidentie van de Engelse koninklijke familie

in de zonne-output gedurende de zonnecyclus van 11 jaar bereiken $0,25 \text{ W/m}^2$. Stel nu dat over een jaar of 100 de wereldbevolking 10 miljard bedraagt en iedereen volgens de Europese levensstandaard leeft en 125 kWh per dag verbruikt uit fossiele, nucleaire of geothermische bronnen. De oppervlakte van de aarde per persoon zou 51.000 m^2 zijn. Als we nu het vermogen per persoon delen door de oppervlakte per persoon, vinden we de extra bijdrage van menselijke energie op $0,1 \text{ W/m}^2$. Dat is een veertigste van waar we ons nu druk over maken, en iets minder dan het effect van de zonnecyclus van $0,25 \text{ W/m}^2$. Dus ja, onder die veronderstellingen zou de menselijke energieproductie zo ongeveer te zien zijn als een bijdrage aan de wereldwijde klimaatverandering.

Ik heb gehoord dat kerncentrales niet in een voldoende tempo kunnen worden gebouwd om een nuttige bijdrage te leveren.

De moeilijkheid om snel kerncentrales te bouwen is overdreven met behulp van een misleidende lezingenmethode die ik "het toverwoord" noem. Bij deze techniek lijken twee dingen te worden vergeleken, maar de basis van de vergelijking wordt halverwege verwisseld. De milieu-redacteur van *The Guardian* schreef in zijn samenvatting van een rapport van de Oxford Research Group: "Wil kernenergie de komende twee generaties een significante bijdrage leveren aan de vermindering van de wereldwijde CO_2 -uitstoot, dan zou de industrie bijna 3000 nieuwe reactoren moeten bouwen - of ongeveer één per week gedurende 60 jaar. Een civiel uitbreidingsprogramma van deze omvang is een utopie en volstrekt onhaalbaar. Het hoogste bouwtempo in de geschiedenis is 3,4 nieuwe reactoren per jaar." 3000 klinkt een stuk groter dan 3,4, nietwaar? In deze toepassing van de "magic pitch" techniek, is de sprong niet alleen op de tijdschaal, maar ook tussen twee regio's. Terwijl het eerste getal (3000 nieuwe reactoren in 60 jaar) betrekking heeft op de gehele planeet, is het tweede getal (3,4 nieuwe reactoren per jaar) het maximum bouwtempo van één enkel land (Frankrijk)!

Een eerlijker presentatie zou de vergelijking op een planeetbrede basis hebben gehouden. Frankrijk heeft 59 van de 429 in bedrijf zijnde kerncentrales in de wereld, zodat het aanneemelijk is dat het maximale toevoegingspercentage in de wereld ongeveer tienmaal zo hoog ligt als in Frankrijk, d.w.z. 34 nieuwe reactoren per jaar. En het vereiste tempo (voor 3000 nieuwe reactoren in 60 jaar) is 50 per jaar. [191] Dus de bewering "Een civiel uitbreidingsprogramma van deze omvang is een utopie en volstrekt onhaalbaar" is gewoon prietpraat. Ja, het is een groot uitbouwpercentage, maar het ligt in dezelfde

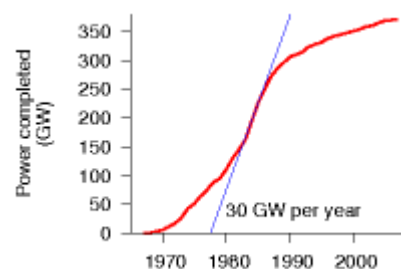


Fig.24.14: Grafiek van de totale sinds 1967 gebouwde en nog in bedrijf zijnde kernenergiecapaciteit in de wereld. Het hoogste tempo van toevoeging was in 1984, met 30 GW per jaar.

orde van grootte als eerdere percentages.

Hoe redelijk is de bewering dat de grootste wereldwijde toevoeging ongeveer 34 reactoren per jaar bedraagt? Laten we eens naar de cijfers kijken. **Fig.24.14** toont het totale vermogen van de nucleaire vloot in de wereld als functie van de tijd, waarbij alleen de reactoren zijn meegerekend die in 2007 nog in bedrijf waren. Het groeitempo was het hoogst in 1984, toen het een waarde had van (tromgeroffel ...) ongeveer 30 GW per jaar - ongeveer 30 1GW-reactoren. Voila.

Hoe zit het met kernfusie?

*We zeggen dat we de zon in een doos zullen stoppen. Het idee is mooi.
Het probleem is, we weten niet hoe we de doos moeten maken.*

Sébastien Balibar, Director of Research, CNRS

Fusie-energie is speculatief en experimenteel. Ik denk dat het onbezonnen is om aan te nemen dat het fusieprobleem zal worden opgelost, maar ik zou graag willen schatten hoeveel energie fusie zou kunnen opleveren als het probleem eenmaal is opgelost.

Deze twee fusiereacties worden als zeer veelbelovend beschouwd:

- de DT-reactie, waarbij deuterium en tritium worden gesmolten en helium wordt geproduceerd; en
- de DD-reactie, waarbij deuterium met deuterium wordt versmolten.

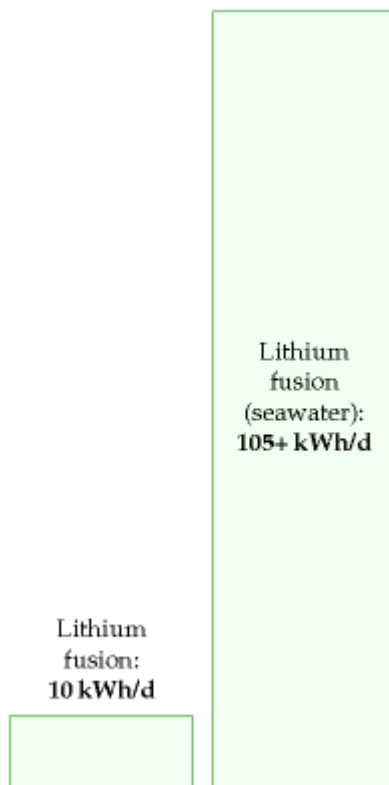
Deuterium, een natuurlijk voorkomende zware waterstofisotoop, kan uit zeewater worden gewonnen; tritium, een nog zwaardere waterstofisotoop, komt in de natuur niet in grote hoeveelheden voor (aangezien de halfwaardetijd slechts 12 jaar bedraagt), maar kan uit lithium worden geproduceerd.

Fig.24.15: (boven) De binnenkant van een experimentele fusiereactor, het JET vacuümvat. Het "plaatje in het plaatje" rechts toont het JET-plasma, genomen met een eenvoudige TV-camera. Foto: EFDA-JET.



ITER is een internationaal project voor de ontwikkeling van een fusiereactor in stabiele toestand. Het ITER-prototype zal gebruik maken van de DT-reactie. DT wordt verkozen boven DD omdat bij de DT-reactie meer energie vrijkomt en "slechts"

100 miljoen °C nodig is om te verlopen, in tegenstelling tot de DD-reactie, waarvoor 300 miljoen °C nodig is. (De maximumtemperatuur in de zon is 15 miljoen °C).



Laten we eens fantaseren en aannemen dat het ITER-project een succes zou worden. Welke duurzame energie zou fusie dan kunnen leveren? Elektriciteitscentrales die gebruik maken van de DT-reactie zullen zonder stroom komen te zitten wanneer het lithium opraakt. Hopelijk zal tegen die tijd de tweede installatie van de fantasie werkelijkheid zijn geworden: Fusiereactoren die alleen deuterium nodig hebben.

Fig.24.16: (links) Fusie op basis van lithium, eerlijk en duurzaam gebruikt, zou in ons verbruik kunnen voorzien. Lithium uit de mijnbouw zou gedurende 1000 jaar 10 kWh/d/p leveren, zeewater 105 kWh/d/p gedurende meer dan een miljoen jaar.

Ik noem deze twee energiebronnen "lithiumfusie" en "deuteriumfusie", naar de primaire brandstof waar het in beide gevallen om gaat. Laten we nu eens inschatten hoeveel energie elk van deze bronnen kan leveren.

[192] Lithiumfusie

De wereldwijde lithiumreserves in ertsafzettingen worden geraamd op 9,5 miljoen ton. Als al deze reserves binnen 1000 jaar aan de fusie worden gevoed, levert dit 10 kWh/d per persoon op.

Er is nog een andere bron van lithium: zeewater, waar lithium aanwezig is in een concentratie van 0,17 ppm. Om lithium uit zeewater te produceren tegen een tempo van 100 miljoen kg per jaar, is naar schatting een energie nodig van 2,5 kWh(el) per gram lithium. Als een fusiereactor 2.300 kWh(el) per gram lithium oplevert, zou de teruggewonnen energie 105 kWh/d per persoon bedragen (uitgaande van 6 miljard mensen). Met dit tempo zou het lithium in de oceaan meer dan een miljoen jaar meegaan.

Deuterium Fusie

Als we ons voorstellen dat wetenschappers en ingenieurs het probleem van DD-fusie kunnen oplossen, hebben we heel goed nieuws. In elke ton water zit 33 gram

deuterium en de energie die kan worden gewonnen uit het samensmelten van slechts één gram deuterium is een krankzinnige 100.000 kWh. Bedenk dat de oceanen 230 miljoen ton per persoon bevatten, en concludeer dat er genoeg energie is om elke persoon van een tienvoudige toename van de wereldbevolking met 30.000 kWh per dag (100 maal het gemiddelde Amerikaanse verbruik) gedurende een miljoen jaar van energie te voorzien (**Fig.24.17**).

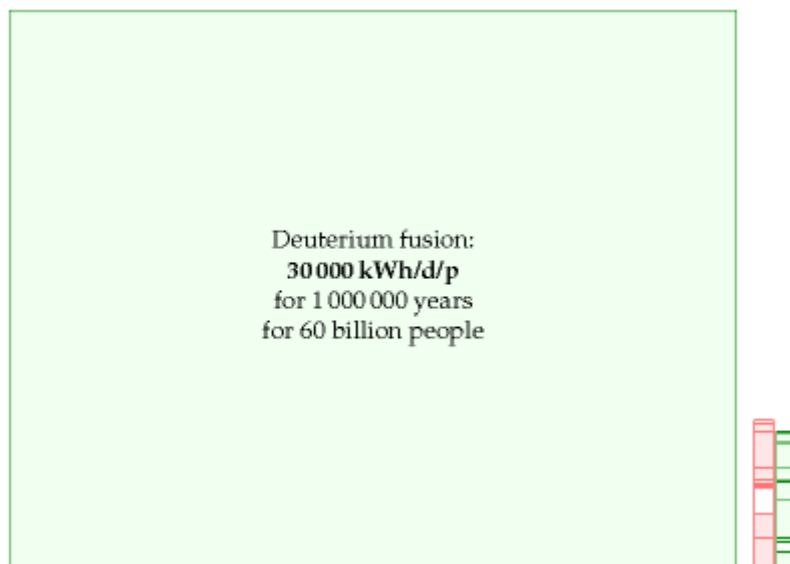


Fig.24.17: Fusie op basis van deuterium biedt, als het haalbaar is, een overvloed aan duurzame energie voor miljoenen jaren. De schaal van het diagram is vertienvoudigd in elke dimensie om de bijdrage van fusie op de pagina te passen. Ter vergelijking zijn de rode en groene stapels van **Fig.18.1** op dezelfde schaal naast elkaar gezet.

[193] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[179]	Fig.24.1 Bron: World Nuclear Association [5qntkb]. De totale capaciteit van werkende kernreactoren is 372 GW(el), zij hebben jaarlijks 65.000 ton uranium nodig. De VS heeft 99 GW, Frankrijk 63,5 GW, Japan 47,6 GW, Rusland 22 GW, Duitsland 20 GW, Zuid-Korea 17,5 GW, Oekraïne 13 GW, Canada 12,6 GW en Engeland 11 GW. In 2007 hebben alle reactoren ter wereld samen 2.608 TWh aan elektriciteit opgewekt, een gemiddelde van 300 GW of 1,2 kWh per dag per persoon.
[181]	Snelle kweekreactoren ... halen dus ongeveer 60 keer zoveel energie uit het uranium 162Snelle kweekreactoren halen 60 keer zoveel energie uit het uranium. Bron: www-world-nuclear.org/info/inf98.html . Momenteel loopt Japan voorop bij de ontwikkeling van snelle kweekreactoren.
[181]	Voor een kerncentrale met een capaciteit van 1 gigawatt is 162 ton uraan per jaar nodig – Een kerncentrale van 1 gigawatt verbruikt 162 ton uranium per jaar. Bron: www-world-nuclear.org/info/inf03.html . Een elektriciteitscentrale van 1 GW(el) met een thermisch rendement van 33% bij een belastingsfactor van 83% heeft de volgende voetafdruk: ontginning - 16 600 ton 1% uraanerts; malen - 191 ton uraanoxide (bevat 162 ton natuurlijk uraan); verrijking en fabricage van splijtstofstaven - 22,4 ton uraanoxide (bevat 20 ton verrijkt uraan). Voor verrijking zijn 115.000 SWU nodig; zie blz. 118 voor de energiekosten van een SWU (scheidingsarbeidseenheid).
[181]	Uranium voorraden zijn ongeveer 1000 keer hoger dan onze veronderstelde 27 miljoen ton - 163 Men schat dat de laagwaardige uraniumvoorraad meer dan 1000 keer groter is dan de 22 miljoen ton waarvan we zojuist uitgingen. Deffeyes en MacGregor (1980) schatten de voorraden uranium in concentraties van 30 ppm of meer op 3×10^{10} ton. (Die mittlere Erzgüte in Südafrika lag 1985 und 1990 bei 150 ppm. Fosfaaten liggen meestal bij 100 ppm in het midden.) Dat zei de World Nuclear Association tegen de Uranreserven in juni 2008: "Van tijd tot tijd wordt de bezorgdheid geuit dat de bekende voorraden ontoereikend zouden kunnen zijn als ze worden beoordeeld als een veelvoud van de huidige mate van gebruik. Maar dit is de denkfout van de Grenzen aan de Groei, ... die geen rekening houdt met het zeer beperkte karakter van de kennis die we op elk moment hebben van wat er zich werkelijk in de aardkorst bevindt. Onze kennis van de geologie is dusdanig dat we er zeker van kunnen zijn dat de geïdentificeerde voorraden van metaalmineralen een klein deel zijn van wat er is." "Gemeten uraniumvoorraden, de hoeveelheid waarvan bekend is dat ze economisch winbaar zijn uit ertslagen, zijn ... afhankelijk van de intensiteit van de exploratie-inspanningen in het verleden, en zijn in feite een verklaring over wat bekend is in plaats van wat er in de aardkorst aanwezig is." "De huidige gemeten uraanreserves in de wereld (5,5 miljoen ton) ... zijn voldoende voor meer dan 80 jaar. Dit is een hoger niveau van verzekerde voorraden dan normaal is voor de meeste mineralen. Verdere exploratie en hogere prijzen zullen, op basis van de huidige geologische kennis, zeker meer voorraden opleveren naarmate de huidige worden opgebruikt". "Economisch rationele spelers zullen alleen investeren in het vinden van deze nieuwe reserves wanneer zij er het volste vertrouwen in hebben dat zij er rendement uit zullen halen, wat meestal positieve prijsberichten vereist die worden veroorzaakt door onderbevoorradingstendenzen. Als het economisch systeem correct werkt en de kapitaalefficiëntie maximaliseert, zou er nooit

	meer dan enkele tientallen jaren van een grondstof in reserves mogen zijn op een bepaald moment in de tijd." Exploratie heeft een kostprijs; exploratie naar uranium, bijvoorbeeld, heeft een kostprijs gehad van \$1- \$1,50 per kg uranium (\$3,4/MJ), wat 2% is van de spotprijs van \$78/kgU; in - 194 - contrast daarmee hebben de opsporingskosten van ruwe olie gemiddeld rond de \$6/vat (\$1050/MJ) gelegen (12% van de spotprijs) gedurende tenminste de laatste drie decennia]. "In tegenstelling tot de metalen waarnaar al eeuwenlang vraag is, is de samenleving nog maar nauwelijks begonnen met het gebruik van uranium. Er is slechts één cyclus geweest van exploratie-ontdekking-productie, grotendeels aangedreven door de prijsspieken aan het eind van de jaren 1970." "Het is voorbarig om te spreken over uranumschaarste op lange termijn wanneer de hele nucleaire industrie zo jong is dat slechts één cyclus van aanvulling van de hulpbronnen nodig is geweest." www-world-nuclear.org/info/inf75.html Verdere lectuur: Herring (2004); Price en Blaise (2002); Cohen (1983). Het IPCC, dat de OESO citeert, schat dat bij de huidige stand van zaken in 2004 het uranium in conventionele voorraden en fosfaten 670 jaar meegaat voor eenmalige reactoren, 20.000 jaar voor snelle reactoren met opwerking van plutonium, en 160.000 jaar voor snelle reactoren met opwerking van uranium en alle actiniden. (Sims et al., 2007).
[183]	Japanse onderzoekers hebben een manier gevonden om uranium uit zeewater te halen... 165 Japanse onderzoekers hebben een techniek gevonden om uranium uit zeewater te halen. De kostenraming van 100 dollar per kg is afkomstig van Seko et al. (2003) en [y3wnzr]; de raming van 300 dollar per kg is afkomstig van het Agentschap voor kernenergie van de OESO (2006, blz. 130). Uranium wordt gewonnen met behulp van doek dat enkele maanden in de oceaan is ondergedompeld; het doek bestaat uit polymeervezels die ontvankelijk zijn gemaakt door bestraling vóór onderdompeling; de ontvankelijke vezels verzamelen uranium met een snelheid van 2 g uranium per kg vezels.
	183 De kosten voor de winning van uranium uit zeewater zouden kunnen worden verlaagd indien de winning zou worden gecombineerd met een ander gebruik van het zeewater - bij voorbeeld de koeling van krachtcentrales. – De kosten van uraniumwinning zouden kunnen worden verlaagd door deze te combineren met een ander gebruik van zeewater, bijvoorbeeld voor de koeling van krachtcentrales. Het idee van een door kernenergie aangedreven eiland dat waterstof produceert, komt van C. Marchetti. Kweekreactoren zouden worden gekoeld met zeewater en zouden uraan uit het koelwater kunnen halen met een snelheid van 600 ton uraan per 500.000 Mt zeewater.
[184]	Thoriumreactoren leveren 3,6 miljard kWh warmte per ton thorium – 166 Thoriumreactoren leveren $3,6 \times 10^9$ kWh warmte per ton thorium. Bron: www-world-nuclear.org/info/inf62.html. Er is nog steeds potentieel voor verbetering in thoriumreactoren, dus dit cijfer zou in de toekomst kunnen stijgen.
[185]	Een alternatieve kernreactor voor thorium, de "Rubbiatron" – Een alternatieve kernreactor voor thorium, de "energieversterker"... Zie Rubbia et al. (1995), web.ift.uib.no/~lillestol/Energy Web/EA.html, [32t5zt], [2qr3yr], [ynk54y].
[185]	Tabel.24.7 – Wereldvoorraden thorium in monaziet. Bron: US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, januari 1999. [yl7tkm] geciteerd in UIC Nuclear Issues Briefing Paper #67 november 2004: "Andere minerale ertsen met een hoger thoriumgehalte, zoals thoriëet, zouden waarschijnlijk als bron kunnen worden gebruikt als de vraag aanzienlijk zou toenemen." [yju4a4] laat de waarde voor Turkije weg, die hier kan worden gevonden: [yeyr7z].

[186]	De nucleaire industrie verkoopt iedereen in Engeland nu al zo'n 25 jaar 4 kWh/d – 167 De nucleaire industrie verkocht iedereen in het VK 4 kWh/d gedurende ongeveer 25 jaar. Die erzeugte Summe bis 2006 war etwa 2200 TWh. Quelle: Stephen Salter's Energy Review voor de Scottish National Party. [195]
[186]	De Nuclear Decommissioning Authority heeft een jaarlijkse begroting van 2 miljard euro – De nucleaire ontmantelingsautoriteit heeft een jaarlijkse begroting van 2 miljard pond. In feite lijkt het ontmantelingsbudget alsmaar te stijgen. Het laatste cijfer voor de totale kosten van ontmanteling is £ 73 miljard. news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm
[186]	De kritiek van de Hoofdinspecteur van Nucleaire Installaties was vernietigend – 168 De kritiek van de Hoofdinspecteur van Nucleaire Installaties was vernietigend... (Weightman, 2007).
[187]	Kernenergie is niet oneindig gevaarlijk. Het is gewoon gevaarlijk – Verdere literatuur over risico: Kammen en Hassenzahl (1999).
[187]	Mensen in de buurt van kolengestookte centrales worden blootgesteld aan hogere stralingsdoses dan mensen in de buurt van kerncentrales – Mensen in Amerika die in de buurt van kolengestookte centrales wonen, worden blootgesteld aan hogere stralingsdoses dan mensen die in de buurt van kerncentrales wonen. Bron: McBride et al. (1978). Uranium en thorium hebben concentraties in steenkool van respectievelijk 1 ppm en 2 ppm. Verdere lectuur: gabe-web.psi.ch/research/ra/ra_res.html , www-physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf .
[188]	Kernenergie en wind zijn de beste, met opofferingspercentages van minder dan 0,2 per GWy. – Kernenergie en windenergie hebben de laagste sterftcijfers. Zie ook Jones (1984). Deze slachtofferaantallen zijn afkomstig uit studies die toekomstige ontwikkelingen voorspellen. We kunnen echter ook naar het verleden kijken. In Engeland werd met kernenergie 200 GWy elektriciteit opgewekt, en de nucleaire industrie heeft één dodelijk slachtoffer gemaakt, een werknemer die in 1978 in Chapelcross om het leven kwam [4f2ekz]. Eén ongeval per 200 GWy is een indrukwekkend laag ongevalencijfer in vergelijking met de olie- en gasindustrie. Wereldwijd is het aantal slachtoffers van kernenergie moeilijk te schatten. Bij de meltdown van Three-Mile Island is niemand om het leven gekomen, en de daarmee gepaard gaande lekken hebben in de tijd sinds het ongeluk waarschijnlijk één dode gekost. Het ongeval van Tsjernobyl kostte aanvankelijk 62 mensen het leven door directe straling, en 15 mensen uit de omgeving stierven later aan schildklierkanker; naar schatting 4000 kankerslachtoffers uit de onmiddellijke omgeving en nog eens 5000 mensen wereldwijd (van de 7 miljoen die aan de fall-out werden blootgesteld) stierven aan kanker ten gevolge van Tsjernobyl (Williams en Baverstock, 2006); maar deze sterfgevallen zijn onmogelijk hard te maken, aangezien kanker, vaak veroorzaakt door natuurlijke straling, alleen al in Europa 25% van de sterfgevallen vertegenwoordigt. Een manier om het wereldwijde aantal slachtoffers van kernenergie te bepalen is deze geschatte Tsjernobyl-dodenwolk (9000 doden) te delen door de cumulatieve elektriciteitsproductie van 1969 tot 1996, die 3685 GWy bedraagt. Dat geeft een sterftcijfer van 2,4 doden per GWy. Wat het aantal dodelijke slachtoffers van windenergie betreft, vermeldt het Caithness Windfarm Information Forum (www-caithnesswindfarms.co.uk) wereldwijd 49 sterfgevallen van 1970 tot 2007 (35 werknemers in de windindustrie en 14 burgerslachtoffers). In 2007 vermeldt Paul Gipe 34 dodelijke slachtoffers wereldwijd [www-wind-works.org/articles/Breath-Life.html]. In het midden van de jaren negentig bedroeg het sterftcijfer in verband

	met windenergie 3,5 sterfgevallen per GWy. Volgens Paul Gipe is het aantal dodelijke slachtoffers van windenergie tegen het eind van de jaren 2000 gedaald tot 1,3 per GWy. De historische ongevallencijfers voor zowel kernenergie als windenergie zijn dus hoger dan de voorspelde cijfers voor de toekomst.
[188]	Staal en beton in een kerncentrale van 1 GW hebben een koolstofvoetafdruk van ruwweg 300.000 ton CO ₂ – 169 Het staal en beton in een kerncentrale van 1 GW hebben een koolstofvoetafdruk van ruwweg 300.000 ton CO ₂ . Een kerncentrale van 1 GW bevat 520.000 m ³ - [196] - beton (1,2 miljoen ton) en 67.000 ton staal [2k8y7o]. Uitgaande van 240 kg CO ₂ per m ³ beton [3pvf4j], bedraagt de voetafdruk van beton ongeveer 100.000 ton CO ₂ . Volgens Blue Scope Steel [4r7zpg] bedraagt de voetafdruk van staal ongeveer 2,5 ton CO ₂ per ton staal. Dus de 67.000 ton staal heeft een voetafdruk van ongeveer 170.000 ton CO ₂ .
[188]	Is reactorafval niet een groot probleem – 170 Nucleair afval discussie. Bronnen: www-world-nuclear.org/info/inf04.html , [49hcnw], [3kduo7]. Nieuw kernaafval vergeleken met oud: Comité voor het beheer van radioactief afval (2006).
[192]	Wereld-lithiumreserves in ertsafzettingen worden geraamd op 9,5 miljoen ton – 172 Wereld-lithiumreserves worden geraamd op 9,5 miljoen ton. De belangrijkste lithiumvoorraden bevinden zich in Bolivia (56,6%), Chili (31,4%) en de VS (4,3%). www-dnmpm.gov.br
[192]	Er is nog een andere bron voor lithium: zeewater – Er is nog een andere bron voor lithium: zeewater... Sommige winningstechnologieën zijn bestudeerd (Steinberg en Dang, 1975; Tsuruta, 2005; Chitrakar et al., 2001).
[192]	Als een fusiereactor 2.300 kWh(el) per gram lithium oplevert – Fusie-energie uit lithium reserves. De energiedichtheid van natuurlijk lithium bedraagt ongeveer 7500 kWh per gram (Ongena en Van Oost, 2006). De schattingen van de efficiëntie waarmee fusiereactoren deze energie in elektriciteit kunnen omzetten lopen sterk uiteen, van 310 kWh(el)/g (Eckhartt, 1995) tot 3400 kWh(el)/g natuurlijk lithium (Steinberg en Dang, 1975). Ik ben uitgegaan van 2300 kWh(el)/g, gebaseerd op het vaak geciteerde totaal: "Een fusion-reactor van 1 GW heeft ongeveer 100 kg deuterium en 3 ton natuurlijk lithium per jaar nodig, waarmee ongeveer 7 miljard kWh wordt gegenereerd." [69vt8r], [6oby22], [63l2lp].
	Verdere lectuur over kernsplijting: Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000). Uranium Informatie Centrum - www-uic.com.au . www-world-nuclear.org , [wnchw]. Over de kosten: Zaleski (2005). Over opslagplaatsen voor nucleair afval: [shrln]. Over kweekreactoren en thorium: www-energyfromthorium.com .
	Verdere informatie over kernfusie: www-fusion.org.uk , www-askmar.com/Fusion.html .

25 van elders

leven van de duurzame energie van andere landen?

Of het Middellandse-Zeegebied in de 21e eeuw een gebied van samenwerking of confrontatie wordt, zal van strategisch belang zijn voor onze gemeenschappelijke veiligheid.

Joschka Fischer, Duits minister van Buitenlandse Zaken, februari 2004

We zijn erachter gekomen dat het moeilijk is om van fossiele brandstoffen af te komen terwijl we leven van onze eigen hernieuwbare energiebronnen. Kernenergie heeft ook zijn problemen. Wat kunnen we nog meer doen? OK, dus hoe zou het eruit zien als we leefden van de hernieuwbare energie van anderen? (Niet dat wij enige aanspraak kunnen maken op de hernieuwbare energiebronnen van wie dan ook, zeker, maar misschien dat iemand belangstelling zou hebben om ze aan ons te verkopen).

Voor de meeste middelen van duurzaam leven is grond nodig: als je zonnepanelen wilt, heb je grond nodig om ze op te zetten; als je canola wilt verbouwen, heb je ook grond nodig. Jared Diamond merkt in zijn boek *Collapse* op dat, hoewel vele factoren tot de ineenstorting van de beschaving leiden, zij alle een gemeenschappelijke wortel hebben in het feit dat de bevolkingsdichtheid te groot wordt.

Regio's als Engeland of Europa hebben een probleem omdat ze een grote bevolkingsdichtheid hebben en alle beschikbare duurzame energiebronnen zo diffuus zijn - ze hebben een lage vermogensdichtheid (**Tabel.25.1**). Als we hulp zoeken, moeten we kijken naar landen waar de volgende drie dingen gelden: a) lage bevolkingsdichtheid; b) groot landoppervlak; c) hoge vermogensdichtheid duurzame energiebronnen.

Vermogen per oppervlakte-eenheid Land of zee	
Wind	2W/m ²
Off-shore wind	3W/m ²
Getijdenbekken	3W/m ²
Getijdenstroom	6W/m ²
PV-modules	5-20W/m ²
Planten	0,5W/m ²
Regenwater (hooglanden)	0,24W/m ²
Waterkrachtcentrale	11W/m ²
Zonneschoorsteen	0,1W/m ²
Concentrerende zonne-energie	.
Vermogen (woestijn)	15W/m ²

Tabel 25.1: (boven) *Hernieuwbare centrales moeten op landgrootte zijn omdat hernieuwbare energiebronnen zo diffuus zijn.*

Regio	Bevolking	Oppervlakte (km ²)	Dichtheid (pers. per km ²)	p. persoon (m ²)
Libië	5.760.000	1.750.000	3	305.000
Kazachstan	15.100.000	2.710.000	6	178.000
Saoedi-Arabië	26.400.000	1.960.000	13	74.200
Algerije	32.500.000	2.380.000	14	73.200
Soedan	40.100.000	2.500.000	16	62.300
Wereld	6.440.000.000	148.000.000	43	23.100
Schotland	5.050.000	78.700	64	15.500
Europese Unie	496.000.000	4.330.000	115	8.720
Wales	2.910.000	20.700	140	7.110
Groot-Brittannië	59.500.000	244.000	243	4.110
Engeland	49.600.000	130.000	380	2.630

Tabel 25.2: Enkele regio's, gerangschikt in opklimmende volgorde van bevolkingsdichtheid (vgl. ook p.[335])

[198] In Tabel.25.2 staan enkele landen die aan deze voorwaarden voldoen. De bevolkingsdichtheid van Libië is bijvoorbeeld 70 keer kleiner dan die van Groot-Brittannië en de oppervlakte is 7 keer groter. Andere grote landen met grote oppervlakten zijn Kazachstan, Saudi-Arabië, Algerije en Soedan.

Ik denk dat zonne-energie in al deze landen de grootste belofte inhoudt, vooral geconcentreerde zonne-energiecentrales (CSP-centrales ^{Q3131}), die gebruik maken van spiegels of lenzen om het zonlicht te concentreren. CSP-centrales zijn er in een groot aantal verschillende geometrieën van bewegende spiegels en met verschillende technieken om het vermogen in het brandpunt om te zetten - Stirlingmotor, water onder druk, vloeibaar zout, bijvoorbeeld. Zij leveren alle bijna hetzelfde gemiddelde vermogen per oppervlakte-eenheid, in de orde van grootte van 15 W/m².



Fig.25.3: Stirling Motor. Deze gevormde reflectoren leveren een vermogensdichtheid per landoppervlak van 14 W/m². Foto met dank aan Stirling Energy Systems. www.stirlingenergy.com

Een technologie met een belangrijke bijdrage

"De volledige energiebehoefte van de wereld kan worden opgewekt in een gebied van 100 km bij 100 km in de Sahara." Is dit waar?

CSP in de woestijn levert ongeveer 15 W/m². Dus als in bovengenoemd gebied niets anders wordt toegestaan, is de totale opgewekte stroom 150 GW. Dat is niet

31) ^{Q31} CSP staat voor "Concentrating Solar Power".

hetzelfde als de huidige totale wereldenergiebehoefte. Dat is nog niet eens de totale wereldvraag naar elektriciteit, die 2.000 GW bedraagt.

Fig.25.4: Andasol, Spanje - een "100MW" zonne-energiecentrale in aanbouw. De resterende thermische energie die overdag wordt geproduceerd, wordt tot zeven uur lang opgeslagen in tanks met vloeibaar zout, waardoor een continue en stabiele elektriciteitsvoorziening wordt gegarandeerd. De centrale zal naar verwachting 350 GWh per jaar leveren (40 MW). De parabolische troggen beslaan 400 hectare, zodat de vermogensdichtheid per landoppervlakte 10 W/m² bedraagt. Foto boven: ABB, foto onder: IEA SolarPACES.



De wereldvraag naar energie bedraagt vandaag 15.000 GW. De juiste uitspraak over de energievoorziening van de Sahara zou dus zijn dat een gebied van 1000 km x 1000 km de wereldenergiebehoefte zou kunnen opwekken. Dat is vier keer de oppervlakte van het VK. En als we in een wereld van gelijkheid willen leven, moeten we waarschijnlijk streven naar meer dan het huidige verbruik. Om elke persoon in de wereld te voorzien van het gemiddelde Europese verbruik (125 kWh/d), hebben we twee vierkanten van 1000 km x 1000 km in de woestijn nodig.

Fig.25.7: Het leggen van een HVDC-kabel tussen Finland en Estland. Een dergelijk kabelpaar kan 350 MW aan vermogen overbrengen. Foto: ABB

Gelukkig is de Sahara niet de enige woestijn, zodat het misschien realistischer is de wereld in kleinere regio's te verdelen en uit te zoeken welk gebied in elke plaatselijke woestijn van zo'n regio nodig zou zijn. Dus om ons op Europa te concentreren: Welke oppervlakte in de noordelijke Sahara is nodig om iedereen in Europa en Noord-Afrika te voorzien van de gemiddelde Europese vraag? Als we ervan uitgaan dat de bevolking van Europa en Noord-Afrika 1 miljard bedraagt, daalt de benodigde oppervlakte tot 340.000 km², wat neerkomt op een vierkant van 600 km bij 600 km. [199] Dit komt overeen met één keer Duitsland, 1,4 keer het VK of 16 keer Wales.

Het voor Engeland benodigde aandeel van dit gebied van 16 Wales zou ongeveer één keer Wales bedragen: een gebied van 145 km bij 145 km van de Sahara zou in staat zijn in de volledige primaire energiebehoefte van Engeland te voorzien. Deze gebieden zijn uitgezet in Fig.25.5. Hoewel het gele vierkant "klein" lijkt in vergelijking met Afrika, heeft het de oppervlakte van Duitsland.

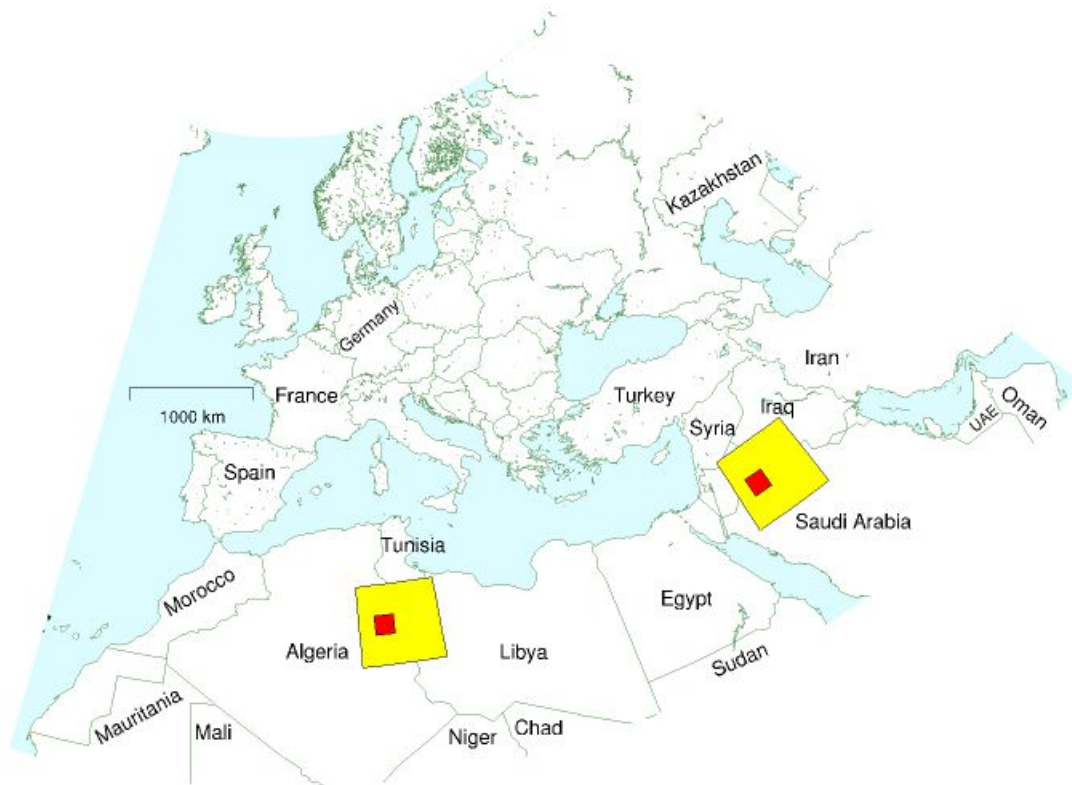


Fig.25.5: Het veel geciteerde kleine vierkant. De kaart toont een vierkant van 600 km bij 600 km in Afrika, een ander in Saudi-Arabië, Jordanië en Irak. CSP-centrales die zo'n vierkant volledig vullen, wekken genoeg energie op om één miljard mensen te voorzien van het gemiddelde Europese verbruik van 125 kWh/d/p. De oppervlakte van zo'n vierkant is gelijk aan de oppervlakte van Duitsland of 16 keer de oppervlakte van Wales. Binnen elk grote – geel – vierkant bevindt zich een ander kleiner – rood – vierkant van 145 km x 154 km, dat in de Sahara nodig is om alle stroom van het VK te leveren.

Het DESERTEC-plan

Een organisatie genaamd DESERTEC [www-desertec.org] brengt een plan op de markt om CSP-centrales in zonnige mediterrane landen te gebruiken om elektriciteit op te wekken en die elektriciteit via hoogspanningsgelijkstroomkabels (HVDC) te transporteren naar de meer bewolkte noordelijke delen (zie Fig.25.7). HVDC-technologie wordt al sinds 1954 gebruikt om stroom te transporteren via lijnen over land en via diepzeekabels (zoals de interconnector tussen Frankrijk en Engeland). Het wordt reeds gebruikt om elektriciteit te vervoeren over afstanden van 1000 km in Zuid-Afrika, China, Amerika, Canada, Brazilië en Congo. Een typische 500kV-lijn transporteert 2 GW aan vermogen. Een paar HVDC-lijnen in Brazilië transpor-

teren 6,3 GW.

HVDC verdient de voorkeur boven traditionele wisselstroomhoogspanningslijnen omdat er minder materiaal en land voor nodig is en de lijnverliezen lager zijn. [200] Het vermogensverlies op een 3.500 km lange HVDC-lijn, inclusief de omzetting van wisselstroom naar gelijkstroom en weer terug, bedraagt ongeveer 15%. Een ander voordeel is dat HVDC-systemen bijdragen tot de stabilisering van de elektriciteitsnetten waarop zij zijn aangesloten.

Tabel.25.6: *Zonne-energiepotentieel van landen in en rond Europa. Het "economisch potentieel" is het vermogen dat zou kunnen worden geproduceerd op geschikte locaties met een normale instraling van meer dan 2000 kWh/m²/j. Het "kustpotentieel" is het vermogen dat zou kunnen worden geproduceerd in kustgebieden tot 20 m boven de zeespiegel. Dit is bijzonder veelbelovend vanwege de mogelijke combinatie met ontziltingsinstallaties. Ter vergelijking: het totale vermogen dat nodig is om 1 miljard mensen van 125 kWh/d/p te voorzien, bedraagt 46.000 TWh/j (5.200 GW). 6.000 TWh/j (650 GW) leveren 16 kWh/d/p voor 1 miljard mensen.*

Land	Economisch potentieel (TWh/j)	Kust potentieel (TWh/j)
Algerije	169.000	60
Libië	140.000	500
Saudi-Arabië	125.000	2.000
Egypte	74.000	500
Irak	29.000	60
Marokko	20.000	300
Oman	19.000	500
Syrië	10.000	0
Tunesië	9.200	350
Jordanië	6.400	0
Jemen	5.100	390
Israël	3.100	1
VAE	2.000	540
Koeweit	1.500	130
Spanje	1.300	70
Qatar	800	320
Portugal	140	7
Turkije	130	12
Totaal	620 000 (70 000GW)	6.000 (650GW)

In de plannen van DESERTEC worden met name kustgebieden in aanmerking genomen voor de bouw van elektriciteitscentrales, omdat de centrales daar ontzilt zee-water als bijproduct leveren dat voor drinkwater of landbouw kan worden gebruikt.

Tabel.25.6 bevat de ramingen van DESERTEC voor de potentiële capaciteit van elektriciteitscentrales in de respectieve landen van Europa en Noord-Afrika. Dit "economisch potentieel" is meer dan nodig om 1 miljard mensen van 125 kWh/d/p te voorzien. Het totale "kustpotentieel" is voldoende voor 16 kWh/d/p voor 1 miljard mensen.



Fig.25.8: Elke ronde blob komt overeen met een gebied van 1500 km^2 , waarvan $1/3$ gevuld met zonne-energiecentrales gemiddeld 10 GW kan leveren. 65 blobs zouden 1 miljard mensen voorzien van 16 kWh/d/p .

Laten we een kaart gebruiken om uit te werken hoe een realistisch plan eruit zou kunnen zien. Laten we zeggen dat we zonnepanelen bouwen van 1.500 km^2 elk - dat is ongeveer de grootte van Londen. (Groot-Londen is 1.580 km^2 groot, en de ringweg M25 rond Londen omsluit een gebied van 2.300 km^2). We noemen deze faciliteit een "blob."

[201] We nemen verder aan dat in elke blob de helft van het gebied gereserveerd is voor CSP-spiegel lenzen (gemiddelde vermogensdichtheid 15 W/m^2) en dat daartussen ruimte zou zijn voor landbouw, gebouwen, wegen, spoorwegen, pijpen en kabels. Als we 10% kabelverliezen toestaan op de weg tussen de blob en de consument, levert elke blob een gemiddeld vermogen van 10 GW .

Fig.25.8 toont enkele blobs op schaal getekend op een kaart. Om een idee te geven

van de schaal, heb ik er ook een paar in Engeland ingetekend. Vier van deze blobs leveren een vermogen dat vergelijkbaar is met het totale elektriciteitsverbruik van het VK (16 kWh/d/p voor 60 miljoen mensen). Vijfenzestig blobs zouden alle 1-miljard mensen in Europa en Noord-Afrika van 16 kWh/d/p voorzien. Fig.25.8 toont 68 blobs in de woestijn.

Fotovoltaïsche cellen met lichtbundeling

Een alternatief voor CSP in de woestijn zijn PV-modules met een groot oppervlak en een lichte bundeling. Om een dergelijke module te vervaardigen, plaatst men een PV-zonnecel van hoge kwaliteit in het brandpunt van goedkope lenzen of spiegels. 202] Faiman et al. (2007) zeggen dat "zonne-energie, in zijn ontwerp als PV met lichtconcentratie, volledig qua kosten vergelijkbaar kan zijn met fossiele brandstoffen [in woestijnstaten als Californië, Arizona, New Mexico, of Texas] en dat er geen subsidies van welke aard dan ook nodig zouden zijn."

Volgens Amonix, de fabrikant, heeft deze vorm van geconcentreerde zonne-energie een vermogensdichtheid per landoppervlakte van **18 W/m²**.

Afb.25.9: Een 25 kW(piek) PV collector met lichtbundeling van de Californische fabrikant Amonix. Een lichtoppervlak van 225 m² bevat 5760 Fresnellenzen met een optische concentratie van x 260, die elk een 25% efficiënte siliciumcel verlichten. In een geschikte woestijnomgeving levert deze collector 138 kWh per dag, genoeg om een halve Amerikaan van stroom te voorzien. Let op de mens voor de grootte vergelijking. Foto door David Faiman.



Een andere manier om een idee te krijgen van de benodigde systeemhardware is door deze te personaliseren. Een van de "25 kW"(piek)-collectoren (**Fig.25.9**) genereert gemiddeld 138 kWh per dag; de Amerikaanse levensstijl verbruikt momenteel 250 kWh per dag per persoon. Dus om de VS fossielvrij te maken met zonne-energie, zou je ongeveer twee van deze 15 m x 15 m collectoren per persoon nodig hebben.

Vragen

Ik ben in de war. In hoofdstuk 6 zei u dat de beste PV-panelen gemiddeld 20W/m² produceerden, op een plaats met Britse zonneomstandigheden. In de woestijn zouden ze waarschijnlijk 40W/m² halen. Hoe komt het dan dat deze systemen, ondanks de lichtbundeling, slechts 15-20 W/m² genereren? Lichte bundeling zou de opbrengst toch moeten verbeteren ten opzichte van eenvoudige platte modules?

Goede vraag. Het korte antwoord is nee. Met CSP wordt geen betere vermogensdichtheid per landoppervlak bereikt dan met vlakke modules. De focusseerders

moeten de zon volgen, anders wordt het brandpunt niet goed verlicht; zodra u land toevoegt met volgfocuseerders, moet u er ruimte tussen laten. Een deel van het zonlicht valt in die ruimtes en gaat verloren. De reden waarom mensen nog steeds systemen met lichtfocus maken en onderzoeken, is dat de huidige platte panelen erg duur zijn en lichtfocus goedkopere systemen mogelijk maakt. Het doel van de CSP-ingenieurs is niet een grote vermogensdichtheid per landoppervlak, want landoppervlak is goedkoop (vanuit hun standpunt). Het doel is om veel stroom per dollar te genereren.

Als platte panelen een grotere energiedichtheid hebben, waarom zijn we dan niet van plan de Sahara ermee te bedekken?

Omdat ik probeer te discussiëren over de haalbare opties voor grootschalige duurzame energieopwekking, voor Europa en Noord-Afrika in 2050. Ik schat dat spiegels in 2050 nog steeds goedkoper zullen zijn dan PV-modules, dus we moeten ons richten op de technologieën die licht bundelen.

Hoe zit het met thermische centrales (zonneshoorstenen)?

Een thermische centrale gebruikt zonne-energie op een zeer eenvoudige manier. Een grote schoorsteen wordt gebouwd in het midden van een ruimte die wordt overdekt met een doorzichtig dak van glas of folie. Omdat warme lucht opstijgt, stijgt de lucht die onder het dak wordt verwarmd, zoals in een glazen huis, via de schoorsteen omhoog en stroomt koudere lucht aan de buitenrand van het overdekte collectorvlak naar binnen. Uit deze luchtstroom wordt energie opgewekt door een [203] turbine aan de voet van de schoorsteen. Thermische centrales zijn betrekkelijk eenvoudig op te zetten, maar zij leveren geen indrukwekkende hoeveelheid stroom per oppervlakte-eenheid. Een proefinstallatie in Manzanares, Spanje, heeft zeven jaar gedraaid, van 1982 tot 1989. De schoorsteen was 195 m hoog en had een diameter van 10 m.

De collector had een diameter van 240 m, en het dak had een oppervlakte van 6.000 m² glas en 40.000 m² kunststofplaten. Het produceerde 44 MWh per jaar, wat overeenkomt met een vermogensdichtheid per oppervlakte-eenheid van 0,1 W/m². Theoretisch geldt dat hoe groter de collector en hoe hoger de schoorsteen, des te hoger het rendement van een thermische centrale. De ingenieurs van Manzanares extrapoleerden dat een 1000 m



Fig.25.10: Het prototype van de thermische centrale in Manzanares. Foto's van solarmillennium.de

hoge schoorsteen, omgeven door een collector met een diameter van 7 km, 680 GWh stroom per jaar zou kunnen opwekken. Dat is een vermogensdichtheid per landoppervlak van ongeveer $1,6 \text{ W/m}^2$, vergelijkbaar met de vermogensdichtheid van windmolenparken in Engeland, en ongeveer een tiende van de vermogensdichtheid van de hierboven genoemde CSP-centrales. Er wordt beweerd dat elektriciteit uit thermische centrales kan worden geleverd tegen een prijs die vergelijkbaar is met die van conventionele elektriciteitscentrales. Ik stel voor dat landen met voldoende landoppervlak en zonneshijn een grote competitie houden tussen thermische centrales en CSP-centrales, gesponsord door olieproducerende en olieverbruikende landen.

Wat dacht je van energie uit IJsland, waar geothermische en waterkracht zo overvloedig aanwezig zijn?

In feite exporteert IJsland reeds energie door te leveren aan industrieën die energie-intensieve producten vervaardigen. IJsland produceert bijvoorbeeld bijna een ton aluminium per hoofd van de bevolking! Vanuit het oogpunt van IJsland zijn hier grote winsten te behalen. Maar kan IJsland Europa redden? Het zou mij verbazen als de energieproductie van IJsland zodanig zou kunnen worden opgeschaald dat zij zelfs voor Engeland een aanzienlijke uitvoer van elektriciteit mogelijk zou maken. Laten we ter vergelijking de interconnector Frankrijk-En-



Fig.25.11: Meer geothermische energie in IJsland. Foto door Rosie Ward.

geland nemen, die 2 GW over het Kanaal kan leveren. Deze maximale output komt overeen met 0,8 kWh per dag per Brit, ongeveer 5% van de gemiddelde elektriciteitsvraag in het VK. De gemiddelde geothermische elektriciteitsproductie van IJsland bedraagt slechts 0,3 GW, wat minder is dan 1% van het gemiddelde elektriciteitsverbruik van het VK. De mediane elektriciteitsproductie van IJsland is 1,1 GW. Om een verbinding te voeden met een invoer van elektriciteit die vergelijkbaar is met die uit Frankrijk, zou IJsland zijn elektriciteitsproductie moeten verdrievoudigen. Om ons te voorzien van 4 kWh/d/p (ongeveer het aandeel van de Britse kerncentrales), zou de elektriciteitsproductie van IJsland moeten vertienvoudigen. Het is waarschijnlijk een goed idee om een koppellijn naar IJsland aan te leggen, maar verwacht niet dat daar aanzienlijke bijdragen overheen zullen vloeien.

[204] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[198]	CSP in de woestijn levert ongeveer 15 W/m² – 178 Concentratie van zonne-energie in woestijnen levert een gemiddeld vermogen per oppervlakte-eenheid op van ruwweg 15 W/m². Mijn bronnen voor deze getallen zijn twee bedrijven die CSP-centrales maken. www-stirling-energy.com zegt dat een van hun spiegels met een 25 kW Stirling motor in het brandpunt 60.000 kWh/jaar kan opwekken in een goed woestijngebied. Je zou ze dicht op elkaar kunnen zetten tot één spiegel per 500 m². Dat geeft een gemiddeld vermogen van 14 W/m². Volgens de fabrikant is deze machine het beste landgebruik in termen van energieopbrengst. www-ausra.com maakt gebruik van vlakke spiegels om water te verhitten tot 285 °C en een stoomturbine te laten draaien. De verwarmde en samengeperste stoom kan worden opgeslagen in diepe, met metaal versterkte cavernes, zodat 's nachts stroom kan worden opgewekt. In hun beschrijving van een "240 MW(el)" centrale voor Australië (Mills en Lièvre, 2004) beweren de plannenmakers dat 3,5 km² spiegels 1,2 TWh(el) zouden kunnen leveren, of 38 W per m² spiegeloppervlak. Om dit om te rekenen naar vermogen per landoppervlakte, zou men de ruimten tussen de spiegels moeten kennen. Ausra zegt dat ze een gebied van 153 km bij 153 km in een woestijn nodig hebben om alle elektriciteit voor de VS op te wekken (Mills en Morgan, 2008). De totale elektriciteit in de VS is 3.600 TWh/j, dus volgt uit de bewering dat de energiedichtheid per landoppervlak 18 W/m² is. Deze technologie wordt omschreven als de Compact Linear Fresnel Reflector (Mills en Morrison, 2000; Mills et al., 2004; Mills en Morgan, 2008). Ausra geeft de voorkeur aan de term thermische zonne-energie (STE) boven geconcentreerde zonne-energie (CSP); zij leggen de nadruk op het voordeel van thermische opslag in vergelijking met geconcentreerde fotonvoltaïsche energie, waarvoor geen intrinsieke opslagmogelijkheid bestaat. Trieb en Knies (2004), belangrijke voorstanders van CSP-technologie, schatten de volgende vermogensdichtheden per landoppervlak voor de verschillende CSP-technologieën: parabolische troggen, 14-19 W/m²; lineaire Fresnel-collector, 19-28 W/m²; toren met heliostaten, 9-14 W/m²; Stirling-spiegels, 9-14 W/m². In Europa zijn er drie demonstratie-CSP-centrales: Andasol - met parabolische troggen; Solúcar PS10, een toren in de buurt van Sevilla; en Solartres, een toren die gebruik maakt van gesmolten zout voor warmteopslag. Het parabolische trogsysteem van Andasol (Fig.25.4) genereert naar verluidt 10 W/m². De zonnetoren "11 MW" van Solúcar heeft 624 spiegels van elk 121 m². Deze spiegels concentreren het zonlicht tot een straling van maximaal 650 kW/m². De ontvanger in de toren ontvangt een piekvermogen van 55 MW. De centrale kan 20 MWh thermische energie opslaan, waardoor de elektriciteitsproductie gedurende 50 minuten van bewolking in stand



Afb.25.12: Twee ingenieurs zetten een eSolar-centrale op met heliostaten (spiegels die kunnen draaien en kantelen om de zon te volgen). *esolar-com* maakt middelgrote energiecentrales: een 33MW(piek)-centrale op 64 hectare. Dat is 51 W/m² (piek), op een typische woestijnlocatie schat ik dat ongeveer 25% daarvan als continu vermogen kan worden geleverd: 13 W/m².

	wordt gehouden. Het zou 24,2 GWh elektriciteit per jaar moeten produceren, op 55 hectare. Dit geeft een gemiddeld vermogen per landoppervlakte van 5 W/m ² . (Bron: Abengoa Annual Report 2003.) Solartres zal 142 hectare beslaan en zal naar verwachting 96,4 GWh per jaar leveren; dit komt overeen met een vermogensdichtheid van 8 W/m ² . Andasol en Solartres zullen beide in normaal bedrijf op aardgas werken.
[199]	HVDC wordt reeds gebruikt om elektriciteit over afstanden van 1000 km te transporteren. – 179 HVDC wordt reeds gebruikt om elektriciteit over afstanden van 1000 km te transporteren in Zuid-Afrika, China, Amerika, Canada, Brazilië en Congo. Quellen: Asplund (2004), Bahrman en Johnson (2007). Weiterführende Literatur über HVDC: Carlsson (2002).
[200]	De verliezen op een 3.500 km lange HVDC-lijn, met inbegrip van de conversie van wisselstroom naar gelijkstroom en terug, zouden ongeveer 15% bedragen. – 179 De verliezen op een 3500 km lange HVDC-lijn, met inbegrip van de conversie van wisselstroom naar gelijkstroom en terug, zouden ongeveer 15% bedragen. Bronnen: Trieb en Knies (2004); van Voorthuysen (2008).
[202]	Volgens de fabrikant Amonix heeft deze vorm van geconcentreerde zonne-energie een vermogensdichtheid per landeenheid van 18 W/m². – 182 Volgens Amonix zouden geconcentreerde fofovoltaïsche systemen een gemiddeld vermogen per landeenheid van 18 W/m ² hebben. De veronderstellingen van www-amonix.com zijn: Lens straalt 85% van het licht door; celrendement 32%; collectorrendement 25% en extra verlies 10% door beschaduwng. De verhouding diafragma/land is 1/3. Normale directe bestralingssterkte: 2222 kWh/m ² /jaar. Verwacht 2000 kWh/jaar output per kW piekvermogen (gemiddeld 0,23 kW). Een elektriciteitscentrale met een piekvermogen van 1 GW zou 12 km ² land vergen en 2000 GWh per jaar leveren. Dat is 18 W/m ² .
[202]	Ein Thermikkraftwerk - Zonneschoorstenen. Quellen: Schlaich J (2001); Schlaich et al. (2005); Dennis (2006), www-enviromission.com.au , www-solarairpower.com .
[203]	De gemiddelde elektriciteitsproductie van IJsland is 1,1 GW – 183 De gemiddelde geothermische elektriciteitsproductie van IJsland is slechts 0,3 GW. De gemiddelde elektriciteitsproductie in IJsland is 1,1 GW. Dit zijn de waarden voor 2006: 7,3 TWh aan waterkracht en 2,6 TWh aan geothermische elektriciteit, met een nominaal vermogen van respectievelijk 1,16 GW en 0,42 GW. Bron: Orkustofnun National Energy Authority [www-os.is/page/energystatistics].
	Weiterführende Literatur: Europese Commissie (2007), Duits Lucht- en Ruimtevaartcentrum (DLR) Instituut voor Technische Thermodynamica Sectie Systeemanalyse en Technology Assessment (2006), www-solarmillennium.de .

26 fluctuaties

Schommelingen en opslag

De wind is als directe drijfkracht volstrekt ontoepasbaar voor een systeem van machinale arbeid, want tijdens een kalm seizoen zou het hele bedrijf van het land uit zijn evenwicht worden gebracht. Vóór het tijdperk van de stoommachines werden windmolens beproefd voor het droogleggen van mijnen; maar hoewel het krachtige machines waren, waren zij zeer onregelmatig, zodat in een lange periode van kalm weer de mijnen verdrongen waren en alle werklieden werkloos werden.

William Stanley Jevons, 1865 ^{Q3232}

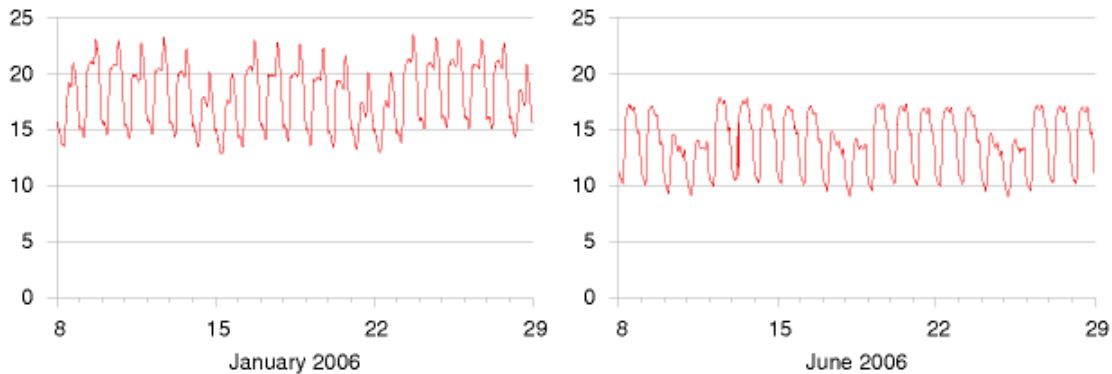


Fig.26.1: Britse elektriciteitsvraag (in kWh/d per persoon) gedurende drie weken in winter en zomer 2006. De pieken in januari liggen elke avond om 18.00 uur. U kunt de vijfdaagse werkweek in zomer en winter zien. (Als u de nationale vraag in GW wilt afleiden, bedenk dan dat het hoogste segment van de getoonde schaal, 24 kWh/d per persoon, overeenkomt met 60 GW in het VK).

Als we alle fossiele brandstoffen laten vallen en uitsluitend hernieuwbare energiebronnen gebruiken, of uitsluitend kernenergie, of een mix van die twee, hebben we misschien een probleem. De meeste grote hernieuwbare energiebronnen kunnen niet naar believen worden in- en uitgeschakeld. Als de wind waait en de zon opkomt, ligt de energie voor het oprapen, maar na misschien twee uur is ze weg. Kerncentrales zijn normaliter ook niet ontworpen om naar believen te worden in- en uitgeschakeld. Zij lopen normaal door en hun uitgangsvermogen kan in het beste

32) ^{Q32} The wind, as a direct motive power, is wholly inapplicable to a system of machine labour, for during a calm season the whole business of the country would be thrown out of gear. Before the era of steamengines, windmills were tried for draining mines; but though they were powerful machines, they were very irregular, so that in a long tract of calm weather the mines were drowned, and all the workmen thrown idle

geval op een tijdschaal van uren worden op- en afgevoerd. Dit is een probleem omdat in het elektriciteitsnet verbruik en productie op elk moment gelijk moeten zijn. Het elektriciteitsnet kan geen energie opslaan. Om een energieschema elke minuut van elke dag te laten werken, hebben we iets nodig dat gemakkelijk aan en uit te zetten is. Algemeen wordt aangenomen dat dit iets dat gemakkelijk kan worden in- en uitgeschakeld een energiebron moet zijn die wordt in- en uitgeschakeld om schommelingen in het aanbod ten opzichte van het verbruik te compenseren (bijvoorbeeld een aardgascentrale!) Maar een andere, even doeltreffende manier om aanbod en verbruik gelijk te schakelen zou een verbruiker van energie zijn die gemakkelijk kan worden in- en uitgeschakeld - een energieput die bij de geringste gelegenheid kan worden in- of uitgeschakeld.

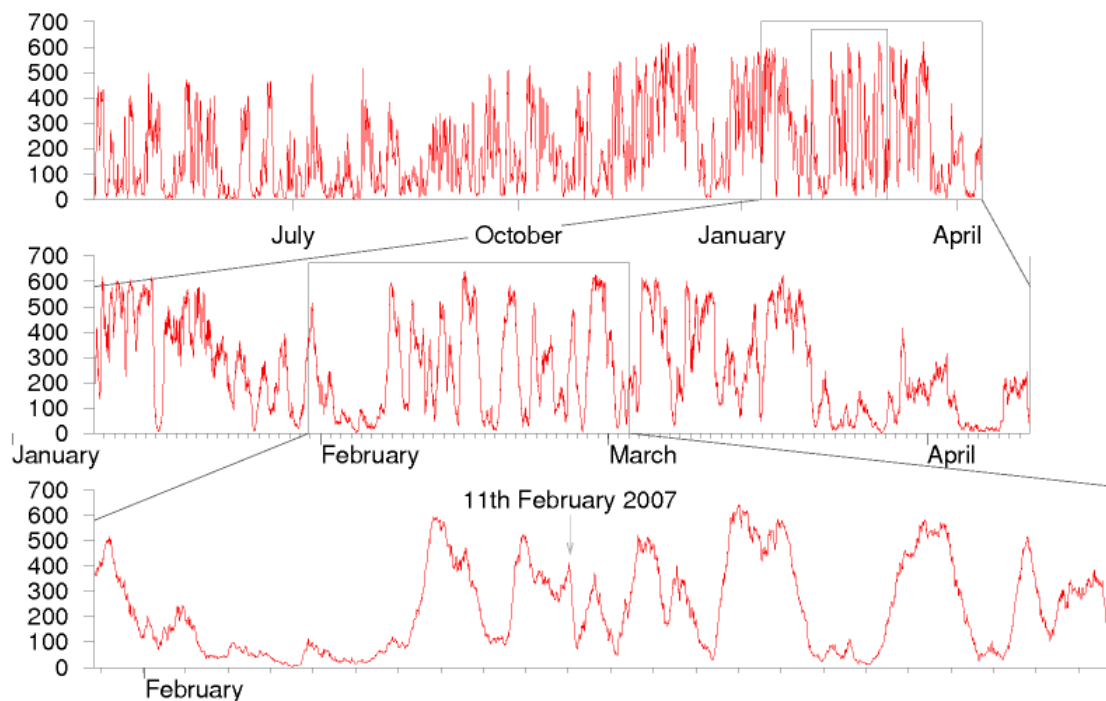


Fig.26.2: Totale output van alle windmolenparken in Ierland, in MW, van april 2006 tot april 2007 (boven), delen daarvan van januari 2007 tot april 2007 (midden), en februari 2007 (onder). De piekvraag in Ierland bedraagt ongeveer 5000 MW. Het "windvermogen" bedraagt 745 MW (in 2007), verdeeld over ongeveer 60 windparken. Datapunten voor elke 15 minuten van www.eirgrid.com.

[207] In ieder geval moet het iets dat gemakkelijk aan en uit kan worden geschakeld een groot iets zijn, omdat de fluctuaties in de energiebehoefte groot zijn (Fig.26.1). Soms schommelt de vraag aanzienlijk op een tijdschaal van enkele minuten. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe kan worden omgegaan met schommelingen in vraag en aanbod zonder gebruik te maken van fossiele brandstoffen.

Hoe sterk fluctueren hernieuwbare energiebronnen?

Hoezeer we ook van hernieuwbare energiebronnen houden, we mogen niet verhullen dat wind fluctueert.

Critici van windenergie zeggen: "Windenergie is intermitterend ^{Q3333} en onvoorspelbaar, dus kan het niet bijdragen tot de continuïteit van de voorziening; als we enorme windmolenparken bouwen, hebben we evenveel thermische centrales op fossiele brandstoffen nodig zodat we een back-up hebben als de wind uitvalt." Krantenkoppen als "Afnemende windenergie leidt tot stroomnood in Texas" versterken dit standpunt. Voorstanders van windenergie bagatelliseren het probleem: "Maak je geen zorgen - individuele windparken kunnen intermitterend zijn, maar samen genomen is de som van de windkracht uit verschillende gebieden omdat minder intermitterend."

Laten we naar de reële cijfers kijken om een objectief standpunt in te nemen. **Fig.26.2** toont de gesommeerde output van alle windparken in de Republiek Ierland van april 2006 tot april 2007. Zeker is dat wind intermitterend is, zelfs als we vele turbines verspreid over een heel land bij elkaar optellen. Engeland is iets groter dan Ierland, maar het probleem blijft hetzelfde. Tussen oktober 2006 en februari 2007 waren er 17 dagen waarop de output van alle 1632 Engelse windmolens onder 10% van hun nominale capaciteit bleef. Dit omvatte vijf dagen met een productie van minder dan 5% van de nominale capaciteit en één dag met slechts 2%.

Laten we de fluctuaties in nationale windenergie kwantificeren. De twee aspecten zijn kortdurende schommelingen en langdurige rustperiodes. Laten we eens kijken naar de snelste verandering van korte duur in een maand IJslandse gegevens. [208] Op 11. februari 2007 daalde het Ierse windvermogen gestaag van 415 MW om middernacht tot 79 MW om 4 uur 's morgens. Dat is een veranderingssnelheid van 84 MW per uur voor een nationaal vermogen van 745 MW. (Met veranderingssnelheid bedoel ik de snelheid waarmee de geleverde output stijgt of daalt - de helling van de grafiek op 11 februari). OK: Als we het Britse windvermogen opschalen tot 33 GW (zodat het gemiddeld 10 GW kan leveren), kunnen we incidentele verandingspercentages hebben van

$$84 \text{ MW/h} \times \frac{33.000 \text{ MW}}{745 \text{ MW}} = 3.700 \text{ MW/h}$$

als Engeland op Ierland lijkt. ^{Q3434} We moeten dus ofwel in staat zijn om de vervan-

33) ^{Q33} De term "intermitterend" beschrijft oorspronkelijk het gedrag van niet-lineaire dynamische systemen wanneer zij overgaan in een chaotische toestand. In de context van energiebronnen wordt het ook gebruikt om het fluctuerende en onregelmatige gedrag te beschrijven, intermitterendheid als een kwalitatieve maatstaf voor de omvang van deze onregelmatige fluctuaties.

34) ^{Q34} Dit is waar als de oorzaken van de schommelingen in het hele land gecorreleerd zijn, bij-

ging van windenergie met hetzelfde tempo van 3,7 GW per uur op te voeren - dat is, laten we zeggen, vier kerncentrales van nul tot honderd per uur - of we moeten in staat zijn om ons verbruik met 3,7 GW per uur te verminderen.

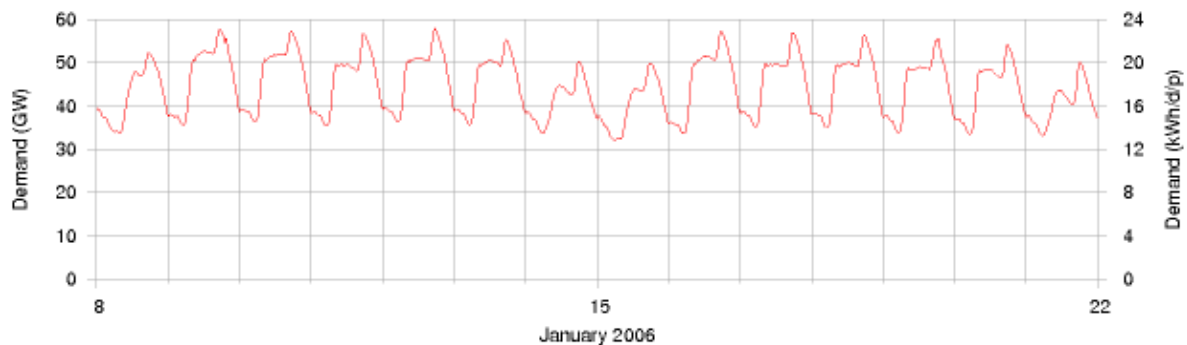


Fig.26.3: Elektriciteitsvraag in het VK gedurende twee weken in de winter van 2006. De linker- en rechterschaal geven de vraag weer in respectievelijk nationale eenheden (GWh) en in persoonlijke eenheden (kWh/d per persoon). Dit zijn dezelfde gegevens als in Fig.26.1.

Kan aan dergelijke winderige eisen überhaupt worden voldaan? Om deze vraag te beantwoorden, moeten we het iets meer over "gigawatts" hebben. Gigawatts zijn grote, landelijke eenheden van vermogen. Zij zijn voor een land wat een kilowatt-uur-per-dag is voor een individu: een mooie passende maat. Het gemiddelde energieverbruik van Engeland is ongeveer 40 GW. We kunnen dit nationale verbruik relateren aan het persoonlijke verbruik: 1 kWh/d per persoon komt overeen met 2,5 GW op nationaal niveau. Als iedereen 16 kWh elektriciteit per dag verbruikt, bedraagt de nationale energiebehoefte 40 GW.

Is een nationale veranderingssnelheid van **4 GW per uur** volledig buiten de menselijke ervaring? Nee. Zoals uit **Fig.26.3** blijkt, stijgt het verbruik in het VK elke ochtend van 6.30 tot 8.30 uur met 13 GW. Dat is een veranderingssnelheid van 6,5 GW per uur. Onze bevoorradingstechnici worden dus geconfronteerd met dagelijkse veranderingen van meer dan 4 GW per uur op het nationale net. Een mogelijke extra verandering van 4 GW per uur als gevolg van plotselinge windschommelingen is geen redelijke reden om het idee van landelijke windparken te verwerpen. [209] Het is een probleem dat vergelijkbaar is met de problemen die ingenieurs reeds hebben opgelost. We moeten alleen zien uit te vinden hoe we de steeds veranderende consumptie en het steeds veranderende aanbod op elkaar kunnen afstemmen zonder fossiele brandstoffen. Ik zeg niet dat dit probleem al is opgelost - alleen dat

voorbeeld afhankelijk van grootschalige weerpatronen. Indien daarentegen lokale, onafhankelijke fluctuaties elkaar overlappen, is een correctere schatting een schaling met de vierkantswortel van de capaciteitsratio, d.w.z. $84 \text{ MW/h} \times \sqrt{(33.000/745)} = 560 \text{ MW/h}$. Typisch zal de werkelijke superpositie elementen van beide aspecten bevatten (d.w.z. fluctuaties zullen zowel door gecorreleerde als door niet-gecorrleerde gebeurtenissen worden veroorzaakt) en de werkelijk optredende waarde zal tussen deze twee berekende uitersten liggen. Voor de rest van de ramingen wordt uitgegaan van de bovengrens.

het een probleem is van dezelfde orde van grootte als andere problemen die al zijn opgelost.

OK, voordat we naar oplossingen gaan zoeken, moeten we het andere probleem van de wind oplossen: langdurige windstilte. Begin februari 2007 heerste er in Ierland een windstilte die vijf dagen aanhield. Dit was niets ongewoons, zoals u kunt zien in **Fig.26.2**. Windstiltes van twee of drie dagen komen verscheidene keren per jaar voor.

Er zijn twee manieren om 'stiltes' te overbruggen. Ofwel kunnen we ergens energie opslaan voor de pauze, ofwel moeten we de vraag verminderen tijdens deze momenten. (Of een mix van de twee.) Als we 33GW aan windturbines hebben die een gemiddelde van 10GW aan energie leveren, dan is de hoeveelheid energie die we van te voren moeten opslaan of gedurende 5 dagen moeten conserveren

$$10 \text{ GW} \times (5 \times 24 \text{ h}) = 1200 \text{ GWh}$$

(Het gigawattuur (GWh) is de handige energie-eenheid voor naties. Het energieverbruik van Engeland bedraagt ongeveer 1000 GWh per dag).

Om deze waarde te personaliseren: Een energieopslag van 1200 GWh voor de natie komt overeen met een energieopslag van 20 kWh per persoon. Met een dergelijke energieopslag zou het land het vijf dagen zonder 10 GW kunnen stellen, of zou elk individu het vijf dagen zonder 4 kWh elektriciteit per dag kunnen stellen.

Omgaan met stille periodes en tempo's van verandering

Wij moeten twee problemen oplossen: de periodes van stilstand (lange periodes van lage productie van hernieuwbare energie) en van verandering (schommelingen op korte termijn in het verbruik of het aanbod). Wij hebben deze problemen gekwantificeerd uitgaande van de veronderstelling dat Engeland 33 GW aan windenergie produceert. Om de schaarste op te vangen, moeten we op schaal 1.200 GWh energie opslaan (20 kWh per persoon). De snelheid van verandering die we moeten verwerken is 6,5 GW per uur (of 0,1 kW per uur per persoon).

Er zijn twee oplossingen, die we beide kunnen opschalen om deze problemen op te lossen. De eerste oplossing is gecentraliseerd, de tweede gedecentraliseerd. De eerste oplossing slaat de energie op en vangt schommelingen op door een bron die door die opslag wordt gevoed in of uit te schakelen. De tweede werkt door een deel van het verbruik aan of uit te schakelen.

De eerste oplossing zijn pompaccumulatiecentrales. De tweede maakt gebruik van de batterijen voor elektrische voertuigen die we in [hoofdstuk 20](#) hebben besproken.

Alvorens deze oplossingen te beschrijven, wil ik enkele alternatieve manieren voorstellen om met wijzigingspercentages om te gaan.

Andere maatregelen aan de aanbodzijde om schommelingen op te vangen.

Sommige hernieuwbare energiebronnen kunnen aan en uit worden gezet. Als we een grote hoeveelheid hernieuwbare energie zouden hebben die we gewoon aan of uit zouden kunnen zetten, zouden alle problemen van dit hoofdstuk verdwijnen. Landen als Noorwegen of Zweden hebben grote en diepe hydro-reservoirs met krachtcentrales die zij kunnen aan- of uitschakelen. Wat zouden de opties voor Engeland kunnen zijn?

Ten eerste zou Engeland een groot aantal WKK-centrales op basis van afval en biomassa kunnen hebben die de rol van de huidige WKK-centrales op basis van fossiele brandstoffen overnemen.

[210] Indien deze centrales aan en uit zouden werken, zou dit kosten met zich meebrengen die vergelijkbaar zijn met die van conventionele WKK-centrales die slechts deeltijds werken: Hun generatoren staan gedeeltelijk stil en werken gedeeltelijk dubbel hard; en de meeste generatoren zijn daarbij minder efficiënt dan wanneer zij gelijkmatig draaien. OK, kosten buiten beschouwing gelaten, de hamvraag is hoe groot onze aan/uit middelen zouden zijn. Als we al ons huishoudelijk afval zouden verbranden, plus dezelfde hoeveelheid landbouwafval, zou de gemiddelde output ongeveer 3 GW bedragen. Als we nu centrales zouden bouwen voor het dubbele van die capaciteit, d.w.z. verbrandingsovens installeren voor 6 GW met een plan om ze slechts de helft van de tijd te laten werken, zouden ze 6 GW kunnen leveren tijdens perioden van grote vraag en nul in de tussenliggende perioden. Deze WKK-centrales zouden kunnen worden gebouwd om binnen een uur aan en uit te gaan, waarbij een fluctuatie van 6 GW per uur zou kunnen worden opgevangen - maar slechts tot maximaal het fluctuatieniveau van 6 GW! Dat is een nuttige bijdrage, maar niet genoeg om fluctuaties op te vangen wanneer we te maken hebben met fluctuaties van 33 GW aan wind.

Hoe zit het met waterkracht? De waterkrachtcentrales in Engeland hebben een belastingsfactor van 20%, dus ze hebben zeker potentieel om te worden in- en uitgeschakeld. Waterkracht heeft ook de prettige eigenschap dat zij zeer snel kan worden in- en uitgeschakeld; Glendoe bijvoorbeeld, een nieuwe waterkrachtcentrale met een vermogen van 100 MW, kan in 30 seconden van uit naar aan worden geschakeld. Dat is een veranderingssnelheid van 12 GW per uur met maar één centrale! Een voldoende groot park waterkrachtcentrales kan dus de schommelingen van een enorm windmolenpark opvangen. De capaciteit van de huidige waterkrachtcentrales in Engeland is echter niet groot genoeg om bij te dragen tot ons fluctuatieprobleem (als we het moeten stellen met snelle fluctuaties van, zeg, 10 of 33 GW aan windenergie). De totale capaciteit van de Britse waterkrachtcentrales bedraagt

slechts 1,5 GW.

Het eenvoudigweg in- en uitschakelen van andere duurzame energiebronnen is dus geen haalbare kaart voor het VK. We hebben andere oplossingen nodig.

Pompaccumulatiecentrales

Bij pompaccumulatie wordt goedkope elektriciteit gebruikt om water van een lager gelegen meer naar een hoger gelegen meer te pompen, en vervolgens wordt weer elektriciteit opgewekt wanneer dat winstgevend is. Zij doen dit met behulp van turbines, net als die in waterkrachtcentrales.

Engeland heeft vier pompaccumulatiiereservoirs die 30 GWh kunnen opslaan (**Tabel.26.4, Fig.26.6**). Zij worden gewoonlijk gebruikt om 's nachts een restje elektriciteit op te slaan dat overdag wordt teruggeleverd, vooral bij pieken in de vraag - een winstgevende activiteit, zoals blijkt uit **Fig.26.5**. De centrale van Dinorwig - een indrukwekkende kathedraal in een berg in Snowdonia - speelt zo'n veiligheidsrol: zij beschikt over voldoende stroom om het nationale net weer op te starten na een totale uitval. Dinorwig kan in 12 seconden van 0 tot 1,3 GW vermogen inschakelen.

Tabel.26.4: *Pompaccumulatiecentrales in Engeland. De maximale energie die kan worden opgeslagen is ongeveer 30 Gwh.*

Opslaginstallatie	Vermogen (GW)	Hoogte (m)	Volume (mln. m ³)	opgeslagen energie (GWh)
Ffestiniog	0,36	320-295	1,7	1,3
Cruachan	0,40	365-334	11,3	10
Foyers	0,30	178-172	13,6	6,3
Dinorwig	1,80	542-494	6,7	9,1

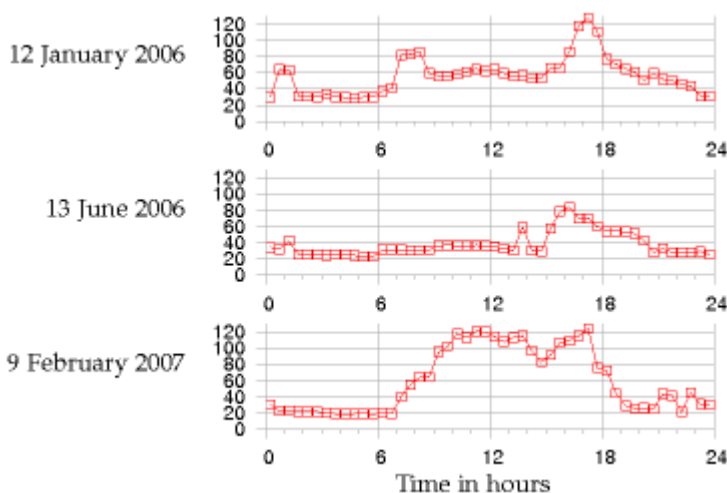


Fig.26.5: *Hoe pompaccumulatiecentrales zichzelf financieren. Elektriciteitsprijzen in £ per MWh, op drie dagen in 2006 en 2007.*

Dinorwig is de koningin van onze faciliteiten. Laten we eens kijken naar haar levensverhaal. De totale energie die in Dinorwig kan worden opgeslagen is 9 GWh. Het bovenste meer ligt ongeveer 500 m boven het onderste, en het werkvolume van 7 miljoen m³ stroomt met een maximum van 390 m³/s, waardoor een energieproductie van 1,7 GW gedurende 5 uur mogelijk is. De efficiëntie (doeltreffendheid) van de installatie is 75%.

[211] Als alle vier de pompaccumulatiecentrales tegelijk worden ingeschakeld, leveren zij 2,8 GW. Zij kunnen uiterst snel worden ingeschakeld en reageren op elke denkbare verandering die zich kan voordoen door schommelingen in het verbruik of door windschommelingen. Maar de capaciteit van 2,8 GW is niet voldoende om 10 GW of 33 GW aan windenergie te vervangen als die plotseling wegvalt. En zelfs de totale opgeslagen energie (30 GWh) is bij lange na niet de 1200 GWh die nodig is om een grote stilstand te overbruggen. Kan pompaccumulatie worden uitgebreid? Kunnen we ons voorstellen dat we het hele "slack"-probleem kunnen oplossen met alleen pompaccumulatie? Kunnen we 1200 GWh opslaan?

Kunnen we 1200 GWh opslaan?

Wij zijn geïnteresseerd in de bouw van een veel groter opslagsysteem dat 1200 GWh kan opslaan (ongeveer 130 keer meer dan Dinorwig). En we zouden graag een capaciteit van 20 GW hebben - ongeveer 10 keer hoger dan Dinorwig. Zo ziet de pompaccumulatie-oplossing eruit: We zouden ongeveer 12 nieuwe centrales moeten bouwen, elk met 100 GWh - ongeveer 10 keer meer energie dan Dinorwig. De pompen en generatoren in elke centrale zouden ruwweg vergelijkbaar zijn met die in Dinorwig.

Ervan uitgaande dat de generatoren 90% efficiënt zijn, geeft **Tabel.26.7** een aantal manieren, met verschillende opvoerhoogteverschillen, om 100 GWh op te slaan. (Voor de natuurkunde achter deze tabel, zie de aantekeningen aan het eind van dit hoofdstuk).

Tabel.26.7: *Pompaccumulatie. Mogelijkheden om 100 GWh op te slaan. Ter vergelijking met kolom 2: het werkvolume van Dinorwig bedraagt 7 miljoen m³ en dat van Lake Windermere 300 miljoen m³. Ter vergelijking met kolom 3: Rutland Water heeft een oppervlakte van 12,6 km², Carron Valley reservoir is 3,9 km². Het grootste meer in Engeland is Loch Lomond met 71 km².*

Opslagcapaciteit voor 100 GWh		
Hoogte verschil water	Werkvolume (mln. m ³)	Meergrootte oppervlakte diepte
500m	80	2 km ² x 40m
500m	80	4 km ² x 20m
200m	200	5 km ² x 40m
200m	200	10 km ² x 20m
100m	400	10 km ² x 40m
100m	400	20 km ² x 20m



Afb.26.6: *Llyn Stawlan, het bovenste reservoir van het Ffestiniog pompaccumulatieproject in Noord-Wales. Opgeslagen energie: 1,3 GWh. Foto door Adrian Pingstone*

[212] Is het aannemelijk dat er 12 van zulke locaties gevonden kunnen worden? We zouden zeker enkele turbines kunnen bouwen zoals Dinorwig in Snowdonia alleen al. **Tabel.26.8** toont twee alternatieven in de buurt van Ffestiniog waar twee turbines vergelijkbaar met Dinorwig hadden kunnen worden gebouwd. Deze locaties werden in de jaren 1970 samen met Dinorwig onderzocht en uiteindelijk werd voor Dinorwig gekozen.

Fig.26.8: Alternatieve locaties voor pompaccumulatie in Snowdonia. Op beide locaties zou het staartwater een nieuw kunstmatig reservoir zijn.

Plaats	Vermogen (GW)	Hoogte (m)	Volume (mln, M ³)	Opgeslagen Energie (GWh)
Bowydd	2,40	250	17,7	12,0
Croesor	1,35	310	8,0	6,7

Pompaccumulatie met een aanzienlijk grotere energie-inhoud dan Dinorwig zou in Schotland kunnen worden gebouwd door bestaande waterkrachtcentrales te moderniseren. Eén kandidaat zou Loch Sloy als het bovenmeer gebruiken en Loch Lomond als het benedenmeer. Er is al een klein hydro-elektrisch systeem dat de twee lochs verbindt.

Fig.26.9 toont deze lochs en de lochs van Dinorwig op dezelfde schaal. Het hoogteverschil tussen Loch Sloy en Loch Lomond is ongeveer 270 m. Het gebied van Loch Sloy is ongeveer 1,5 km² groot, en kan nu al een energie van 20 GWh opslaan. Als de dam met 40 m zou worden verhoogd, zou er nog eens 40 GWh bijkomen. Het waterpeil in Loch Lomond zou in één cyclus tot 0,8 m opschuiven. Dit is minder dan de seizoensgebonden schommeling van het waterpeil van Loch Lomond (2 m).

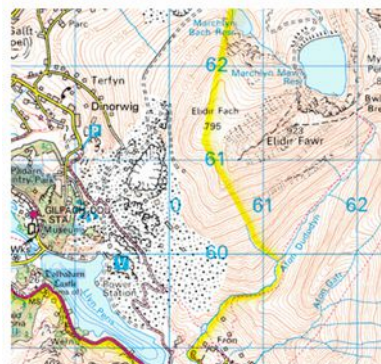
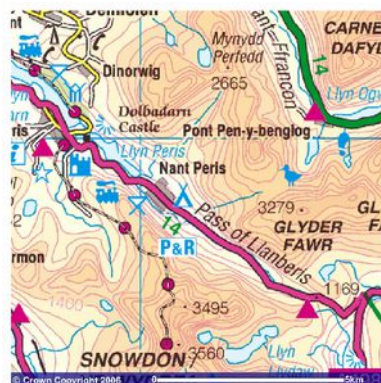
We kunnen de kaart van het Verenigd Koninkrijk afzoeken voor meer plaatsen. De beste plaatsen zouden in de buurt van windmolenparken zijn. Eén idee zou zijn om een nieuw kunstmatig meer aan te leggen in een hellend dal (onderaan afgesloten door een dam als stuwdam) en de zee te gebruiken als het afvalwater.

Fig.26.10 toont 13 mogelijke locaties voor pompaccumulatie in Schotland. Als tien daarvan hetzelfde potentieel hadden als ik zojuist voor Loch Sloy heb geraamd, zouden we 400 GWh kunnen opslaan - een derde van de totale 1200 GWh die we nastreven.

Nog verder denkend, voorbij meren en dammen, zou men zich kunnen voorstellen de helft van de faciliteit te verplaatsen naar ondergrondse spelonken. Er is al een voorstel gedaan voor een pompaccumulatiekamer van een kilometer onder Londen.

[213] Door het bouwen van pompaccumulatie, zo lijkt het, zouden we onze ener-

gieopslagcapaciteit kunnen verhogen van 30 GWh tot 100 GWh of misschien wel 400 GWh. Maar de gehoopte 1200 GWh is nog niet bereikt. Gelukkig is er een andere oplossing.



Dinorwig is the home of a 9GWh storage system, using Marchlyn Mawr (615E,620N) and Llyn Peris (590E,598N) as its upper and lower reservoirs.



Loch Sloy illustrates the sort of location where a 40GWh storage system could be created.

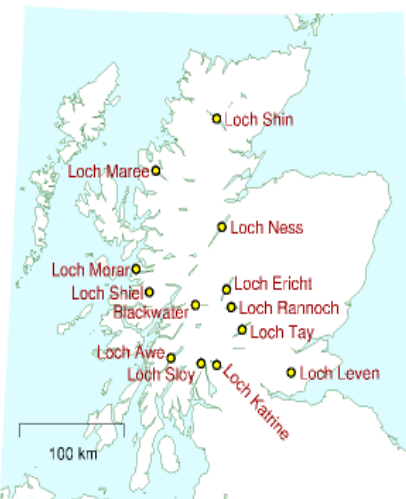


Fig.26.10: (links) Lochs in Schotland met potentieel voor pompaccumulatie.

214] Verbruiksbeheer met elektrische voertuigen

Om onze eisen samen te vatten: We willen 1200 GWh kunnen opslaan of bewaren - dat is 20 kWh per persoon - en het hoofd kunnen bieden aan schommelingen in de energievoorziening tot 33 GW - dat is 0,5 kW per persoon. Deze getallen zijn glorieus gelijk aan de energie- en vermogensbehoefte van elektrische voertuigen. De elektrische auto's die we in hoofdstuk 20 hebben gezien, hadden een energieopslag variërend van 9 kWh tot 53 kWh. Een nationaal wagenpark van 30 miljoen elektrische auto's zou een hoeveelheid energie kunnen opslaan die vergelijkbaar is met 20 kWh per persoon. Typische acculaders verbruiken 2 tot 3 kW. Door de 30 miljoen

batterijladers tegelijkertijd aan te zetten, verandert het verbruik met ongeveer 60 GW! De gemiddelde stroom die nodig is om al het vervoer in het land van stroom te voorzien als het allemaal elektrisch zou zijn, is ongeveer 40 of 50 GW. Er is dus een zeer goede match tussen de invoering van elektrische auto's zoals voorgesteld in hoofdstuk 20 en de bouw van ongeveer 33 GW aan windturbines die gemiddeld 10 GW aan stroom leveren.

Hier is een manier om die wedstrijd uit te buiten: Elektrische auto's kunnen thuis of op het werk worden aangesloten op slimme opladers. Deze laders zouden zowel de waarde van de elektriciteit als de eisen van de bestuurder kennen (b.v. "Mijn auto moet maandag om 7 uur vol zijn"). De lader zou nu gevoelig zijn voor de eisen van de gebruiker, energie zuigen wanneer de wind waait en uitschakelen wanneer de wind stopt of andere vormen van verbruik toenemen. Deze slimme laders leveren een zeer nuttige bijdrage tot de stabilisering van het net, die uiteraard financieel kan worden beloond.



Afb.26.11: (onder) Okinawa pompaccumulatiecentrale, waarvan het staartwater de oceaan is. Opgeslagen energie: 0,2 GWh. Foto met dank aan J-Power www-ieahydro.org.

Een bijzonder stabiele oplossing zou zijn als de autoaccu's vervangbaar zouden zijn. Stel je voor dat je naar een benzinestation gaat en er een stel nieuwe batterijen in doet ter vervanging van de lege. Het benzinestation zou verantwoordelijk zijn voor het opladen van de accu's en zou dat op de perfecte tijdstippen kunnen doen, door de laders aan en uit te zetten, zodat aanbod en verbruik altijd in evenwicht zijn. Vervangbare batterijen zijn een bijzonder stabiele oplossing omdat er miljoenen vervangingsbatterijen in de magazijnen van de tankstations liggen. Deze reservebatterijen zouden een extra buffer geven bij windstille. Sommige mensen zeggen: Horror! Hoe kon ik het tankstation vertrouwen om zorgvuldig voor mijn batterij te zorgen?" Prima, maar je kunt vandaag net zo goed vragen: "Wat als de benzinestations benzine met water mengen?". Ik rij veel liever in een auto die door vakmensen wordt onderhouden dan door een muppet als ik!

Laat me onze opties nog eens overlopen. Wij kunnen het schommelende verbruik en het schommelende aanbod in evenwicht houden door generatoren aan en uit te zetten (afvalverbrandingsovens en waterkrachtcentrales, bijvoorbeeld), door energie ergens op te slaan en terug te voeden wanneer zij nodig is, en door het verbruik aan of uit te zetten.

De meest veelbelovende van deze drie opties is het aan- en uitzetten van het verbruik bij het opladen van elektrische voertuigen. 30 miljoen auto's, elk met een batterij van 40 kWh (waarvan sommige verwisselbare batterijen in oplaadstations kun-

nen zijn), samen goed voor 1200 GWh. Uiteraard zou, indien ook het vrachtvervoer geëlektrificeerd zou worden, de totale opslagcapaciteit navenant hoger zijn.

Windenergie en elektrische voertuigen passen dus uitstekend bij elkaar. Als we elektrische voertuigen en windenergie in hetzelfde tempo opvoeren, zeg 3000 nieuwe voertuigen voor 3MW windturbines, en als we ervoor zorgen dat de oplaadsystemen voor de elektrische auto's intelligent worden geregeld, zou deze synergie het probleem van de windschommelingen al een heel eind oplossen. [215] Natuurlijk, als mijn voorspelling over waterstofauto's onjuist blijkt te zijn, en waterstofauto's de energiezuinige voertuigen van de toekomst blijken te zijn, dan zou dezelfde synergie het gevolg kunnen zijn, omdat wind-waterstof net zo goed samengaat als wind-elektrische auto's. Windturbines wekken elektriciteit op; en wanneer er elektriciteit in overvloed is, zou waterstof worden opgewekt en opgeslagen in tanks voor later gebruik, hetzij in voertuigen, hetzij in andere toepassingen zoals glasproductie.

Meer ideeën over Verbruiksmanagement en Opslag

Er zijn nog andere ideeën over dit onderwerp die ik kort zal aanstippen.

Het afstemmen van het productietempo in de industriële productie op de beschikbare hoeveelheid energie is niet nieuw. Veel aluminiumproducerende fabrieken liggen dicht bij waterkrachtcentrales; hoe meer het regent, hoe meer aluminium er wordt geproduceerd. Overal waar energie wordt gebruikt om bewaarbare goederen te produceren, is er potentieel om de energievraag op intelligente wijze aan en uit te zetten. Ontzilting van zeewater door omgekeerde osmose, bijvoorbeeld (zie blz. [106]), is in veel landen (maar niet in Engeland) een grote energieverbruiker. Een ander bewaarbaar goed is warmte. Als we verwarmingssystemen in gebouwen elektrificeren, zoals in [hoofdstuk 21](#) wordt overwogen, schept dit ook mogelijkheden voor elektriciteitsverbruik op het net dat gemakkelijk kan worden in- en uitgeschakeld. Goed geïsoleerde gebouwen houden de warmte gedurende vele uren vast en hebben daarom enige flexibiliteit in het tijdstip waarop zij verwarmen. Bovendien kunnen grote thermische reservoirs worden gecreëerd in gebouwen, en warmtepompen kunnen worden gebruikt om warmte in of uit deze reservoirs te pompen tijdens perioden van overvloedige elektriciteitsvoorziening; en vervolgens kan een tweede set warmtepompen worden gebruikt om de warmte of koude te verdelen naar de juiste plaatsen in het gebouw, naar gelang van de behoefte.

Het automatisch regelen van de vraag naar elektriciteit zou niet erg moeilijk zijn. Het eenvoudigste zou zijn indien apparaten zoals koelkasten of diepvriezers gevoelig zouden zijn voor de frequentie van de stroomvoorziening. Als er een tekort is aan elektriciteit in het net, daalt de frequentie tot onder de standaardwaarde van 50 Hz; als er een overschot aan energie is, stijgt de frequentie tot boven 50 Hz. (Het is

als een fietsdynamo: als het licht brandt, moet je harder trappen om de extra kracht te krijgen; als je dat niet doet, gaat de fiets een beetje langzamer). Koelkasten zouden kunnen worden aangepast om hun thermostaat een heel klein beetje hoger of lager te zetten, afhankelijk van de frequentie van het elektriciteitsnet, zodat zij, zonder uiteraard de temperatuur van uw boter in gevaar te brengen, de neiging hebben alleen stroom van het elektriciteitsnet te betrekken wanneer dit zich daarmee stabiliseert.

Kan vraagrespons een belangrijk deel van de virtuele opslagcapaciteit voor zijn rekening nemen? Hoeveel stroom verbruiken de koelkasten van een land? Een typische koelkast verbruikt ongeveer 18 W; laten we eens schatten dat er 30 miljoen koelkasten zijn. Het vermogen om alle koelkasten van het land een paar minuten aan en uit te zetten zou dus overeenkomen met 0,54 GW aan automatisch aanpasbaar vermogen. Dat is vrij veel - meer dan 1% van de totale consumptie van het land - en ongeveer evenveel als de plotselinge verbruikspiek die wordt veroorzaakt door mensen die gelijktijdig hun waterkoker aanzetten in een daad van religieuze contemplatie (b.v. het kijken naar "Lindenstrasse"). Dergelijke "TV-pieken" veroorzaken doorgaans een verbruiksstijging van 0,6 tot 0,8 GW. Automatische omschakeling van koelkasten zou deze dagelijkse pieken van gemeenschappelijk theewater koken bijna compenseren. De slimme koelkasten zouden ook kortetermijnschommelingen in de windproductie kunnen opvangen. TV-pieken in combinatie met de heilige der heilige handelingen van het kijken (bijvoorbeeld wanneer Duitsland tegen Engeland speelt) kunnen plotselinge pieken van meer dan 2 GW veroorzaken. [216] In dergelijke gevallen kunnen consumptie en productie alleen in evenwicht worden gehouden door de volle macht van power station Dinorwig.

Om de netbeheerders, die voortdurend elektriciteitscentrales in- en uitschakelen om verbruik en aanbod met elkaar in evenwicht te brengen, meer flexibiliteit te geven, is met veel industriële afnemers van elektriciteit contractueel overeengekomen dat de netbeheerders het verbruik van de afnemer met zeer weinig waarschuwing kunnen in- en uitschakelen. In Zuid-Afrika (waar vaak stroomtekorten zijn) zijn in honderdduizenden huizen radiogestuurde verbruiksbeheersystemen geïnstalleerd, waarmee airconditioners en waterverwarmers kunnen worden geregeld.

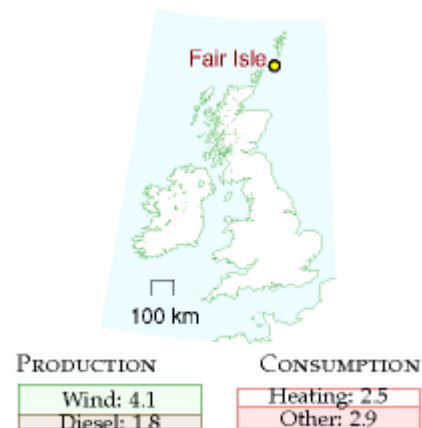
De oplossing van Denemarken

Zo krijgt Denemarken grip op de fluctuaties in hun windenergie. De Denen betalen in feite voor waterkrachtcentrales in andere landen om hun opslagcapaciteit te mogen gebruiken. Bijna alle windenergie van Denemarken wordt geëxporteerd naar de Europese burens, waarvan sommige waterkrachtcentrales hebben die zij inkrimpen om het Deense windaanbod weer in evenwicht te brengen. De bespaarde waterkracht wordt dan terugverkocht aan de Denen (tegen een hogere prijs) wanneer er daar een hoog verbruik is met weinig wind. Het komt erop neer dat de Deense

windenergie nuttige energie levert en dat het totale systeem voldoende stabiliteit heeft dankzij de waterkrachtcapaciteit.

Zou Engeland het Deense systeem kunnen overnemen? Wij zouden directe interconnectoren nodig hebben naar landen met grote hoeveelheden koppelbare en loskoppelbare waterkrachtcapaciteit, of een grote interconnectie met het netwerk in heel Europa. Noorwegen heeft 27,5 GW waterkrachtcapaciteit, Zweden ongeveer 16 GW en IJsland 1,8 GW. Een HVDC-verbinding van 1,2 GW met Noorwegen werd reeds in 2003 voorgesteld, maar niet gebouwd. Een verbinding met Nederland - de BritNed-interconnector met een capaciteit van 1 GW - zal in 2010 worden aangelegd. De windenergiecapaciteit van Denemarken bedraagt 3,1 GW, en Denemarken heeft interconnecties met Noorwegen (1 GW), Zweden (0,6 GW) en Duitsland (1,2 GW), voor een totale exportcapaciteit van 2,8 GW, wat qua schaal vergelijkbaar is met zijn windenergiecapaciteit. Om zijn overschot aan windenergie op de Deense manier te exporteren, zou Engeland (uitgaande van 33 GW aan windenergiecapaciteit) verbindingen in de orde van grootte van 10 GW naar Noorwegen, 8 GW naar Zweden en 1 GW naar IJsland nodig hebben.

Fig.26.12: *Elektriciteitsproductie en -verbruik op Fair Isle, 1995-96. Alle cijfers in kWh/d per persoon. De productie is groter dan het verbruik omdat 0,6 kWh/d per persoon wordt weggegooid.*



Een oplossing met twee elektriciteitsnetten

Een radicale aanpak is om windenergie in een apart tweede net te voeden en te gebruiken om apparaten van stroom te voorzien die geen betrouwbare stroom nodig hebben, zoals verwarmingstoestellen of opladers van autoaccu's. [217] Fair Isle in Schotland (70 inwoners, 5,6 km²) beschikt al meer dan 25 jaar (sinds 1982) over twee elektriciteitsnetten die stroom distribueren van twee windturbines en, indien nodig, een dieselgenerator. De standaard stroomvoorziening is voorzien op één net, en elektrische kachels worden via een tweede kabeltraject aangevoerd. Het stroomnet voor verwarming wordt hoofdzakelijk gevoed door het overschot aan windenergie dat anders verloren zou gaan. Op afstand programmeerbare frequentiegevoelige relais regelen individuele waterverwarmers en opslagverwarmers in particuliere woningen in de gemeenschap. De frequentie van de toevoerleiding wordt gebruikt om de verwarmers te vertellen dat ze moeten worden ingeschakeld. In feite zijn er zes frequentiekanalen per huishouden, waardoor het systeem zeven netwerken kan

emuleren. Fair Isle heeft ook met succes proeven gedaan met een systeem voor de opslag van kinetische energie (een vliegwiel) dat de energieschommelingen van de windkracht op een tijdschaal van 20 seconden opslaat.

Elektrische auto's als generatoren

Als 30 miljoen elektrische auto's bereid zouden zijn om hun laders in tijden van nationaal energietekort achteruit te laten draaien en energie terug te voeden in het net, zou dat bij 2 kW per auto in totaal 60 GW opleveren - vergelijkbaar met de totale capaciteit van alle elektriciteitscentrales in het land. Als slechts één op de drie voertuigen is aangesloten en beschikbaar is op het moment dat het nodig is, zou dat nog steeds een potentiële bron van 20 GW opleveren.

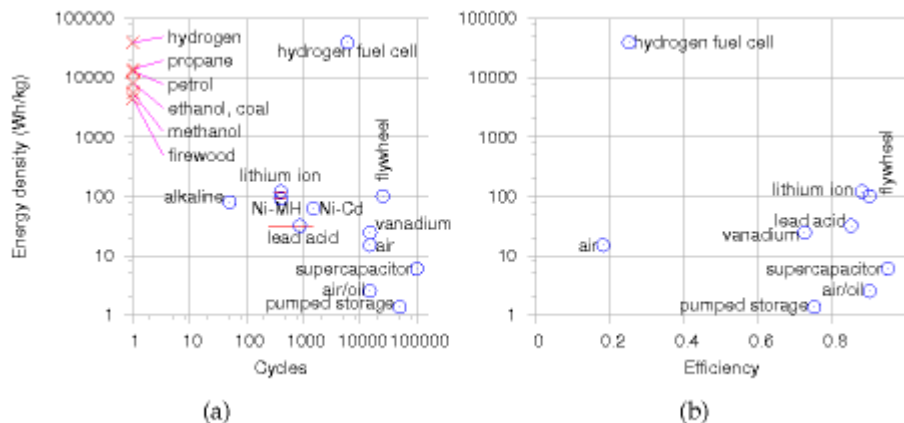


Fig.26.13: Enkele eigenschappen van opslagsystemen en brandstoffen. (a) Energiedichtheid (in logschaal) versus levensduur (aantal cycli). (b) Energiedichtheid vs. efficiëntie. Bij de energiedichtheid wordt geen rekening gehouden met de massa van houders, behalve bij perslucht. Als rekening wordt gehouden met het gewicht van een cryotank voor waterstof, daalt de energiedichtheid van waterstof van 39.000 Wh/kg tot ongeveer 2.400 Wh/kg.

Als elk van de voertuigen een noodvoorraad van 2 kWh zou leveren - wat neerkomt op ongeveer 20% van de laadcapaciteit van de batterij - zou de volledige vloot dus 20 GWh energie leveren - tweemaal zoveel als de pompaccumulatie-installatie van Dinorwig.

Andere opslagtechnologieën

Er zijn manieren om energie op te slaan en er zijn veel criteria om deze oplossingen te beoordelen.

Fig.26.13 toont drie van de belangrijkste criteria: Energiedichtheid (hoeveel energie kan worden opgeslagen per kg opslagmedium), efficiëntie (hoeveel energie krijg je terug per eenheid die je erin stopt)



Fig.26.15: een van de twee vliegwiel op de Culham fusie-onderzoekslocatie, in aanbouw. Foto EFDA-JET. www-jet.efda.org

en levensduur (hoeveel oplaadcycli kun je doen voordat je het systeem moet vernieuwen). Andere belangrijke criteria zijn: de maximale snelheid waarmee energie in en uit het opslagsysteem kan worden gepompt, vaak uitgedrukt in vermogen per kg; de tijdsduur dat de energie in het systeem kan blijven; en natuurlijk de kosten en de veiligheid van het systeem.

Vliegwielen

Fig.26.15 toont een monstervliegwiel dat korte stroomstoten tot 0,4 GW produceert in een experimenteel systeem. Hij weegt 800 ton. Wanneer hij 225 toeren per minuut draait, slaat hij 1000 kWh op, zodat de energiedichtheid ongeveer 1 Wh per kg is. Een vliegwiel voor energieopslag in een raceauto kan 400 kJ (0,1 kWh) opslaan en weegt 24 kg (blz. 142). Dat is een energiedichtheid van 4,6 Wh/kg.

Vliegwielen met hoge snelheid, gemaakt van speciale materialen, kunnen energiedichtheden tot 100 Wh/kg bereiken.

[218]

Type batterij	Energie dichtheid (Wh/kg)	Levensduur (cycli)
Nikkel-cadmium	45-80	1500
NiMH	60-120	300-500
Lood-zuur batterij	30-50	200-300
Lithium-ion	110-160	300-500
Li-ion polymeer	100-130	300-500
oplaadbaar alkalinebatterij	80	50

Tabel.26.14a (boven) Calorische waarden -energiedichtheden, per kg en per liter- van enkele brandstoffen (in kWh per kg en MJ per liter.

Calorische waarde brandstof (kWh/kg) (MJ/l)		
Propaan	13,8	25,4
Benzine	13,0	34,7
Diesel (DERV)	12,7	37,9
Kerosine	12,8	37
Stookolie	12,8	37,3
Ethanol	8,2	23,4
Methanol	5,5	18,0
Bio-ethanol	21,6	
Steenkool	8,0	
Brandhout	4,4	
Waterstof	39,0	
Aardgas	14,85	0,04

Tabel.26.14b (rechts) Energiedichtheid van sommige batterijen (in kWh per kg). 1 kWh = 1000 Wh. (Midden)

Supercapacitoren

Supercondensatoren zijn geschikt voor de opslag van kleine hoeveelheden elektrische energie (tot 1kWh) wanneer vele bedrijfscycli vereist zijn en het opladen snel moet gebeuren. Bij regeneratief remmen van voertuigen die veel starten en stoppen, zijn supercondensatoren bijvoorbeeld te verkiezen boven accu's. Je kunt supercondensatoren kopen met een energiedichtheid van 6 Wh/kg. Het Amerikaanse bedrijf EESstor bwells beweert veel betere supercondensatoren te kunnen maken met bari-umtitanaat, met energiedichtheden van 280 Wh/kg.

[219] Vanadium redox accumulatoren

VRB Power Systems heeft een opslagsysteem van 12 MWh geleverd voor het windmolenpark van Sorne Hill in Ierland, waarvan de huidige capaciteit "32 MW" bedraagt en zal worden opgevoerd tot "39 MW" (VRB staat voor vanadium redox batterij). Dit opslagsysteem is een grote vloeibare batterij, een oplaadbare redox-opslagcel, met enkele tanks vol vanadium in verschillende chemische toestanden. Dit opslagsysteem kan de output van het windmolenpark afvlakken op een zee-schaal van minuten, maar de maximale tijd gedurende welke het een derde van de output van het windmolenpark kan handhaven tijdens een windstilte is één uur.

Een vanadiumsysteem van 1,5 MWh kost 480.000 dollar en neemt 70 m² ruimte in met een massa van 107 ton. De levensduur is meer dan 10.000 cycli. Zij kan even snel worden opgeladen als ontladen (in tegenstelling tot loodzuur-accu's die vijf keer langzamer moeten worden opgeladen), haar rendement is 70-75% voor de cyclus. Er is ongeveer 1 m³ 2-molair vanadium in zwavelzuur nodig om 20 kWh op te slaan. (Dat is 20 Wh/kg.)

Om 10 GW op te slaan is dus 500.000 m³ nodig (170 zwembaden) - ongeveer haalbaar met 2 m tankhoogte op 500m x 500m.

Het opschalen van de vanadiumtechnologie tot de schaal van pompaccumulatie - 10 GWh - zal waarschijnlijk een aanzienlijk effect hebben op de wereldmarkt voor vanadium, maar er is geen langetermijnschaarste aan vanadium. De huidige wereldproductie van vanadium bedraagt 40.000 ton per jaar. Voor een systeem van 10 GWh is 36.000 ton vanadium nodig, of ongeveer de productie van één jaar. Vanadium wordt momenteel geproduceerd als bijproduct van andere processen, en de totale vanadiumreserves in de wereld worden geraamd op 63 miljoen ton.

"Economische" oplossingen

In de wereld van vandaag, die geen kosten verbindt aan CO₂-verontreiniging, is de financiële horde die een opslagsysteem moet nemen een lelijk alternatief: opslag kan worden gesimuleerd door eenvoudigweg een extra gasgestookte elektriciteitscentrale te bouwen voor extra verbruik en de overtollige energie te verbranden in kachels.

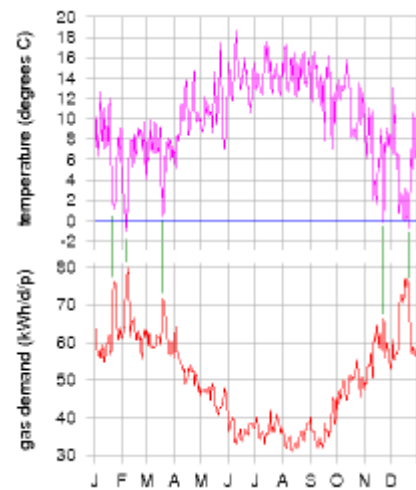
Seizoensgebonden schommelingen

De meest langdurige schommelingen in vraag en aanbod zijn die welke zich gedurende het gehele jaar voordoen. De belangrijkste daarvan is het verbruik door verwarmingssystemen in gebouwen, dat in de winter een piek bereikt. Het huidige aardgasverbruik in het VK varieert in de loop van het jaar van een typisch gemiddelde van 36 kWh/d/p in juli en augustus tot een gemiddelde van 72 kWh/d/p van december tot februari, met extremen van 30-80 kWh/d/p (**Fig.26.16**).

Sommige hernieuwbare energiebronnen kennen ook seizoensgebonden schommelingen - zonne-energie levert meer energie in de zomer en windenergie minder.

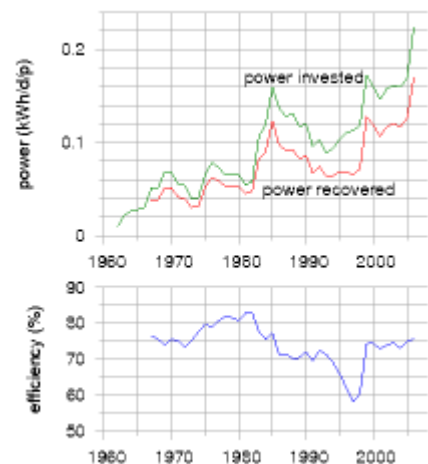
Hoe komen we door deze zeer langdurige schommelingen heen? Elektrische voertuigen en pompaccumulatie kunnen niet helpen op de vereiste schaal. Warmteopslag op lange termijn is in dit verband zeker een nuttige technologie. Een groot rots- of watervat kan een [220] wintervoorraad warmte voor een gebouw opslaan - Bijlage E bespreekt dit idee meer in detail. In Nederland wordt zomerwarmte van wegen tot de winter opgeslagen in grondwaterhoudende lagen en vervolgens met warmtepompen aan gebouwen geleverd [2wmuw7].

Fig.26.16: Gasverbruik (onder) en temperatuur (boven) in Engeland 2007



Opmerkingen Opmerkingen

Pagina	
[207]	de totale output van alle windmolenparken in de Republiek Ierland. -187 De totale output van de windvloot van de Republiek Ierland. Gegevens van eirgrid.com [2hxf6c].
[207]	"Afname van wind veroorzaakt stroomnood in Texas". – Verlies van wind veroorzaakt noodsituatie in het Texaanse elektriciteitsnet'. Als ik dit nieuwsartikel zo lees, was deze gebeurtenis, hoe ongewoon ook, een voorbeeld van een normale werking van het elektriciteitsnet. Het netwerk heeft industriële klanten wiens levering onderbreekbaar is, in het geval van een wanverhouding tussen vraag en aanbod. De windproductie daalde met 1,4 GW op hetzelfde ogenblik dat de vraag van de Texanen met 4,4 GW toenam, wat precies zo'n wanverhouding tussen vraag en aanbod veroorzaakte. De onderbreekbare leveringen werden onderbroken. Alles werkte zoals bedoeld. Hier is een ander voorbeeld, waar een betere planning van het energiesysteem zou hebben geholpen: "Spanje windkracht bereikt record, bezuiniging bevolen." Het gemiddelde elektriciteitsverbruik in Spanje is 31 GW. Op dinsdag 4 maart 2008, leverden de windgeneratoren 10 GW. "De Spaanse elektriciteitsmarkt is bijzonder gevoelig geworden voor windschommelingen."
[207]	Voorstanders van windenergie bagatelliseren het probleem: "Maak je geen zorgen - Individuele windparken kunnen intermitterend zijn, maar samen is de hoeveelheid windenergie uit verschillende gebieden omdat minder intermitterend. -Aanhangers van windenergie bagatelliseren dit probleem: "Maak je geen zorgen - individuele windparken kunnen intermitterend zijn, maar samen genomen is de som van alle windparken veel minder intermitterend." Voor een voorbeeld, zie de website yes2wind.com, die op zijn pagina "debunking the myth that wind power isn't reliable" beweert dat "de variatie in output van windparken verspreid over het land nauwelijks merkbaar is." www.yes2wind.com/intermittency_debunk.html
[207]	Zeker is dat wind intermitterend is, zelfs als we vele turbines verspreid over een heel land bij elkaar optellen -....wind is intermitterend, zelfs als we vele turbines in een heel land bij elkaar optellen. Het VK is iets groter dan Ierland, maar ook daar geldt hetzelfde probleem. Bron: Oswald et al. (2008).
[210]	Het systeemrendement is 75%. - 191 Dinorwig's pomp-opslagrendement is 75%. Figuur 26.17 toont gegevens. Nadere informatie over Dinorwig en de alternatieve locaties voor pompaccumulatie: Baines et al. (1983, 1986).



[212]	Tabel.26.7: - 192 Tabel 26.7. Het benodigde werkvolume, V, wordt als volgt berekend uit de hoogsteval h. Als ε het rendement is van de omzetting van potentiële energie in elektriciteit, dan is $V = 100 \text{ GWh}/(\rho g h \varepsilon)$, Fig.26.17: Effizienz der vier Pumpspeicher-systeme in England [221] waarbij ρ de dichtheid van water is en g de versnelling van de zwaartekracht. Ik heb aangenomen dat de generatoren een rendement van $\varepsilon = 0,9$ hebben.
[212]	Tabel.26.8: - 192 Tabel.26.8, Alternatieve locaties voor pompaccumulatie-installaties. Het voorgestelde hoger gelegen reservoir voor Bowydd was Llyn Newydd, grid referentie SH 722 470; voor Croesor: Llyn Cwm-y-Foel, SH 653 466.
[212]	Als tien daarvan hetzelfde potentieel hadden als ik zojuist voor Loch Sloy heb geraamd, zouden we 400 GWh kunnen opslaan - 193 Als tien Schotse pompaccumulatie-installaties hetzelfde potentieel zouden hebben als Loch Sloy, dan zou er 400 GWh kunnen worden opgeslagen. Deze ruwe schatting wordt ondersteund door een studie van de Strathclyde University [5o2xgu] waarin 14 locaties worden genoemd met een geschatte opslagcapaciteit van 514 GWh.
[215]	Koelkasten kunnen worden aangepast om hun thermostaat hoger of lager te zetten naar gelang van de frequentie van het lichtnet - 196 Koelkasten kunnen zo worden gemodificeerd dat hun interne thermostaten op en neer worden bewogen ... in reactie op de netfrequentie. [2n3pmb] Verdere links: Dynamische vraag www-dynamicdemand.co.uk ; www-rltec.com ; www-responsiveload.com .
[216]	In Zuid-Afrika (waar vaak stroomtekorten zijn) zijn in honderdduizenden woningen radiogestuurde verbruiksbeheersystemen geïnstalleerd. - 197 In Zuid-Afrika... worden systemen geïnstalleerd om de vraag te beheersen. Bron: [2k8h4o] 216 Fast die gesamte dänische Windenergie wird an die europäischen Nachbarn exportiert -Bijna alle windenergie van Denemarken wordt geëxporteerd naar de Europese bureu. Bron: Sharman (2005).
[216]	Al meer dan 25 jaar zijn er twee elektriciteitsnetten op het Schotse eiland Fair Isle - 198 For over 25 years (since 1982), Fair Isle has had two electricity networks. www-fairisle.org.uk/FIECo/ Wind speeds are between 3 m/s and 16 m/s most of the time; 7 m/s is the most probable speed.
[218]	Afb.26.13: - 199 Afb.26.13. Opslagrendementen. Lithium-ion batterijen: 88% efficiënt. Bron: www-national.com/appinfo/power/files/swcap_eet.pdf Lood-zuur batterijen: 85-95%. Bron: www-windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm Opslag van perslucht: 18% efficiënt. Bron: Lemofouet-Gatsi en Rufer (2005); LemofouetGatsi (2006). Zie ook Denholm et al. (2005). Lucht/olie: hydraulische accumulatoren, zoals gebruikt voor regeneratief remmen in vrachtwagens, zijn opslagsystemen op basis van perslucht die 90% efficiënt kunnen zijn rond de rit en waarmee 70% van de kinetische energie kan worden opgevangen. Bronnen: Lemofouet-Gatsi (2006), [5cp27j].
[218]	Tabel.26.14: - Tabel.26.14. Bronnen: Xtronics xtronics.com/reference/energy_density.htm ; Battery University [2sxlyj]; vliegwielinformatie van Ruddell (2003). De nieuwste batterijen met de hoogste energiedichtheid zijn lithium-zwavel- en lithiumsulfidebatterijen, die een energiedichtheid van 300 Wh/kg hebben. Sommige gededilluseioneerde waterstof-enthousiastelingen lijken zich een weg omhoog te banen in het periodiek systeem en borium-enthousiastelingen te worden. Borium (ervan uitgaande dat je het verbrandt tot B2O3) heeft een energiedichtheid van 15 000Wh per kg, wat lekker hoog is. [222] Maar ik stel me voor dat mijn grootste zorg over waterstof ook voor bo-

	rium zal gelden: dat de productie van de brandstof (hier borium uit boriumoxide) inefficiënt zal zijn in energetisch opzicht, en het verbrandingsproces dus ook.
[219]	Vanadium-Redox-Batterie – 200Vanadiumstroombatterijen. Bronnen: www-vrbpower.com; windmolenpark Ierland [ktd7a]; oplaadsnelheid [627ced]; wereldwijde productie [5fasl7].
[220]	Zomerwarmte van de wegen in grondwaterhoudende lagen - 201... zomerwarmte van wegen wordt opgeslagen in aquifers... [2wmuw7].



Fig.26.18: Een mogelijke locatie voor nog een 7 GWh pompaccumulatiecentrale. De Croesor-vallei ligt iets links van het midden, tussen de spitse top (Cnicht) links en de bredere toppen (de Moelwyns) rechts.



27 vijf plannen

Vijf energieplannen voor Engeland

Als we ons willen bevrijden van onze verslaving aan fossiele brandstoffen, hebben we een plan nodig voor onze basisaanpak. En het plan moet werken. Een plan heeft ook een politieke en een financiële blauwdruk nodig. Politiek en economie maken geen deel uit van dit boek, dus ik beschrijf hier alleen hoe de technische kant van een plan dat werkt eruit zou kunnen zien.

Dit zijn mijn plannen die werken. In dit hoofdstuk beschrijf ik vijf van dergelijke plannen. Kies alstublieft niet een van deze plannen uit als "de door de auteur aanbevolen oplossing". Mijn enige aanbeveling is

Zorg ervoor dat uw beleid een plan omvat dat werkt!

Elk plan heeft een verbruiks- en een produktiekant: wij moeten bepalen hoeveel energie ons land zal verbruiken, en hoe die energie moet worden geproduceerd. Om de plannen niet te lang te maken, baseer ik ze opnieuw op het vereenvoudigde Engeland, waar energie slechts op drie manieren wordt verbruikt: Vervoer, verwarming en elektriciteit. Dit is een drastische vereenvoudiging waarbij geen rekening wordt gehouden met industrie, landbouw, voedsel, invoer, enz. Maar ik hoop dat het een nuttige vereenvoudiging is die ons in staat stelt alternatieve plannen binnen een minuut te vergelijken en te contrasteren. Te zijner tijd zullen wij een meer gedetailleerd plan nodig hebben, maar vandaag zijn wij nog zo ver van ons doel verwijderd dat ik denk dat een vereenvoudigde schets de gemakkelijkste manier is om een en ander te begrijpen.

Ik zal een paar plannen presenteren die volgens mij technisch haalbaar zouden zijn voor Engeland tegen 2050. Ze zullen allemaal dezelfde consumptiezijde hebben. Ik benadruk nogmaals dat dit niet betekent dat ik denk dat dit het juiste consumptieplan is, of het enige plan. Aan de andere kant wil ik u niet overstelpen met een hele reeks plannen. Alleen aan de productiekant beschrijf ik een reeks plannen met een andere energiemix van hernieuwbare energiebronnen, "schone steenkool" en kernenergie.

De huidige situatie

De uitgangssituatie van ons vereenvoudigde Engeland is als volgt: Voor vervoer (van personen en goederen) is 40 kWh/d per persoon nodig. Het grootste deel van

deze energie wordt momenteel verbruikt in de vorm van benzine, diesel of kerosine. Voor verwarming (lucht- en waterverwarming) is 40 kWh/d per persoon nodig. Een groot deel van deze energie wordt geleverd door aardgas. De geleverde elektriciteit bedraagt 18 kWh/d/p en maakt gebruik van brandstof (hoofdzakelijk steenkool, gas en kernenergie) met een energie-inhoud van 45 kWh/d/p. De resterende 27 kWh/d/p gaat verloren via de koeltorens (25 kWh/d/p) of tijdens de transmissie in het net (2 kWh/d/p). De totale energie-input in dit "huidige vereenvoudigde Engeland" is 125 kWh/d per persoon.

Gemeenschappelijke punten in alle vijf plannenIn mijn toekomstig vereenvoudigd Engeland wordt het energiegebruik verminderd door het gebruik van efficiëntere technologieën in vervoer en verwarming. In alle vijf toekomstplannen wordt het vervoer grotendeels geëlektrificeerd. [224] Elektrische motoren zijn efficiënter dan benzinemotoren, zodat er minder energie nodig is voor het vervoer. Openbaar vervoer (ook grotendeels geëlektrificeerd) is beter geïntegreerd, beter gepersonaliseerd en beter geregeld. Ik ben ervan uitgegaan dat elektrificatie het vervoer ongeveer vier keer zo efficiënt maakt en dat de groei een deel van deze besparingen compenseert, zodat het netto-effect een halvering van het energieverbruik in de vervoerssector is. Er zijn enkele essentiële voertuigen die niet gemakkelijk kunnen worden geëlektrificeerd, en voor die voertuigen maken we onze eigen vloeibare brandstof (bijvoorbeeld biodiesel of biomethanol of bio-ethanol uit cellulose). De voor het vervoer benodigde energie bedraagt dan 18 kWh/d/p elektriciteit en 2 kWh/d/p vloeibare brandstof. De accu's van de elektrische voertuigen dienen als energieopslag om eventuele schommelingen in aanbod en verbruik te compenseren. Het landoppervlak dat nodig is voor de productie van biobrandstof bedraagt ongeveer 12% van Engeland (500 m² per persoon), ervan uitgaande dat de biobrandstof afkomstig is van 1%-efficiënte planten en dat de brandstofwinning uit de planten 33% efficiënt is. Als alternatief zou biobrandstof kunnen worden ingevoerd als wij andere landen ertoe kunnen overhalen het equivalent aan landbouwgrond (ongeveer de grootte van Wales) voor onze biobrandstoffen te bestemmen.

In alle vijf plannen wordt het energieverbruik voor verwarming teruggedrongen door de isolatie van gebouwen te verbeteren en de binnentemperatuur slimmer te regelen (via thermostaten, voorlichting en promotie door sexy VIP's met coltruien). Nieuwe gebouwen (gebouwd in 2010 of later) zijn zeer goed geïsoleerd en vereisen bijna geen ruimteverwarming. [225] Oude gebouwen (die in 2050 nog altijd meer dan nieuwe gebouwen tellen) worden voornamelijk verwarmd met lucht- en bodemwarmtepompen. Een deel van de waterverwarming gebeurt met zonnepanelen (2,5 m² op elk huis), een deel met warmtepompen en een deel met elektriciteit.

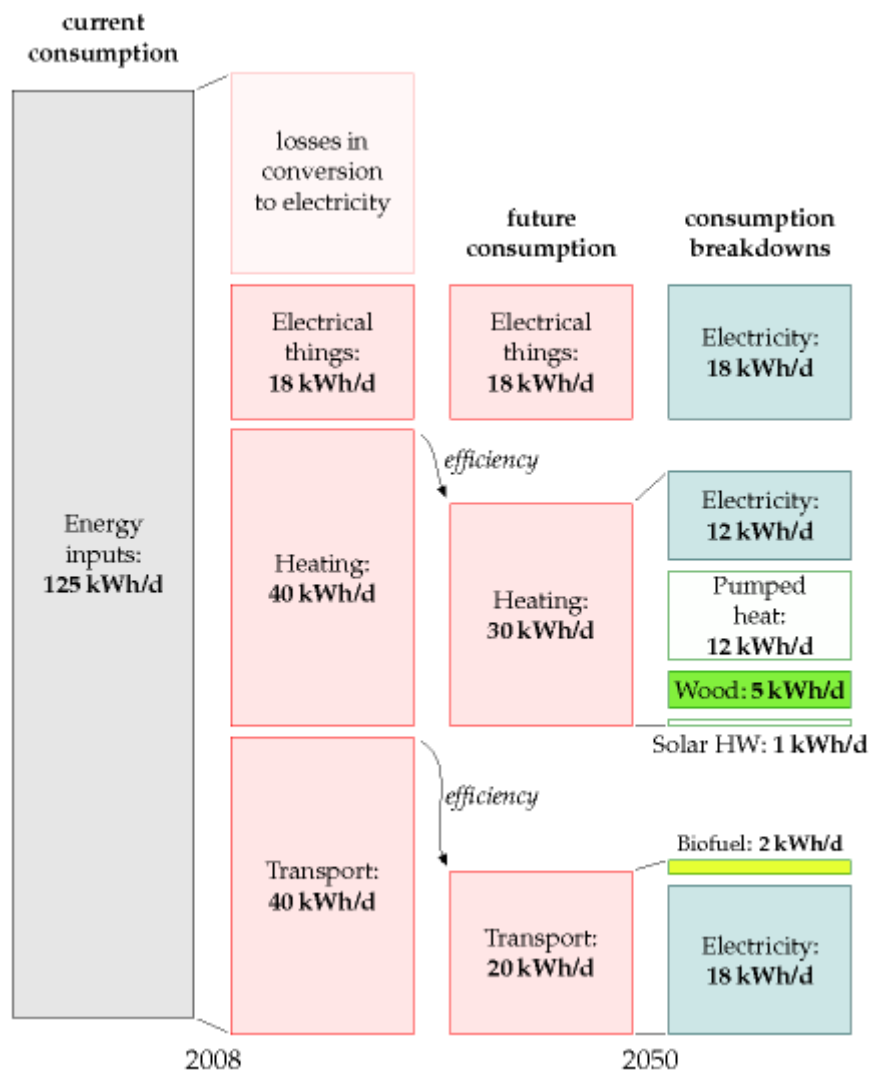


Fig.27.1: Huidig verbruik in "Vereenvoudigd Engeland 2008" (de linker twee kolommen) en geraamd toekomstig verbruik met een uitsplitsing per brandstof (de rechter twee kolommen). Voor dit plan moet de elektriciteitsvoorziening worden verhoogd van 18 tot 48 kWh/d/p.

Sommige gebouwen in de buurt van bossen of aanplantingen van energiegewassen worden verwarmd met biomassa. De energie die nodig is voor verwarming wordt zo teruggebracht van 40 kWh/d/p tot 12 kWh/d/p elektriciteit, 1 kWh/d/p thermische zonne-energie en 5 kWh/d/p brandhout. Het hout voor verwarming (of eventueel warmtekrachtkoppeling) is afkomstig uit nabijgelegen bossen of energiegewassen (misschien miscanthus, wilg of populier) die een totale landoppervlakte van 30.000 km² beslaan (500 m² per persoon). Dit is 18% van de totale landbouwgrond van Engeland, wat neerkomt op 2800 m² per persoon. Energiegewassen worden vooral geteeld op gronden van mindere kwaliteit, waardoor gronden van betere kwaliteit overblijven voor voedselgewassen. Elk aandeel van 500 m² levert jaarlijks 0,5 ton ovengedroogd hout op, wat een energie-inhoud heeft van ongeveer 7 kWh/d. Van deze energie gaat ongeveer 70% verloren in het proces van warmteop-

wekking en -levering. De uiteindelijk bruikbare warmte is 5 kWh/d per persoon.

In deze plannen ga ik ervan uit dat de huidige vraag naar elektriciteit voor apparaten, verlichting, enz. blijft bestaan. Daarvoor hebben we dus nog 18 kWh(el)/d/p als elektriciteit nodig. Ja, de verlichting is efficiënter geworden door de overschakeling op lichtgevend diodes, en veel andere apparaten zullen efficiënter worden, maar dankzij de zegeningen van de economische groei zullen we steeds meer apparaten in ons dagelijks leven hebben - misschien videoconferentiesystemen om ons te helpen minder te reizen.

De totale elektriciteitsvraag stijgt in deze plannen (vanwege de 18 kWh/d/p voor vervoer en de 12 kWh/d/p voor warmtepompen), tot 48 kWh/d/p (of 120 GW nationaal). Dat is bijna een verdrievoudiging van de Britse elektriciteitsvraag. Waar komt deze energie vandaan?

Laat me enkele alternatieven beschrijven. Ze zijn niet allemaal "duurzaam" volgens de definitie van dit boek, maar ze zijn wel allemaal CO₂-neutraal.

Het opwekken van grote hoeveelheden elektriciteit - de componenten

Om grote hoeveelheden elektriciteit op te wekken, wordt in elk van deze plannen gebruik gemaakt van windenergie aan land en op zee, fotovoltaïsche energie, eventueel zonne-energie uit de woestijn, afvalverbranding (huishoudelijk en landbouwafval), waterkracht (op dezelfde schaal als nu), misschien golfenergie, getijdenenergie (inclusief getijdenlagunes en getijdenstroomgeneratoren), misschien kernenergie, en misschien fossiele brandstoffen met opvang en opslag van CO₂. Elk plan mikt op een gemiddelde productie van 50 kWh/d/p - ik krijg deze waarde door de vraag van 48 kWh/d/p naar boven af te ronden, rekening houdend met verliezen in het distributienet.

Bij sommige van de volgende plannen zal energie uit andere landen worden ingevoerd. Om te kunnen vergelijken, is het nuttig onze huidige invoertarieven te kennen. Het antwoord is dat het VK in 2006 28 kWh/d/p aan brandstof importeerde - 23% van de primaire energievraag. Deze invoer wordt gedomineerd door steenkool (18 kWh/d/p), ruwe aardolie (18 kWh/d/p) en aardgas (6 kWh/d/p).

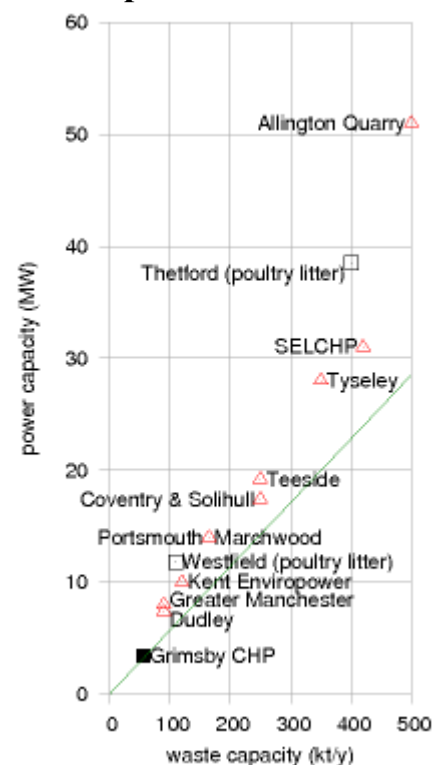


Fig.27.2: Afvalverbrandingsinstallaties in Engeland. De lijn toont de gemiddelde output uitgaande van 1 kg afval → 0,5 kWh elektriciteit.

Kernbrandstof (uranium) wordt gewoonlijk niet meegerekend bij de invoer van energie omdat het gemakkelijk kan worden opgeslagen.

In alle vijf plannen ga ik ervan uit dat we de afvalverbranding opschalen, zodat bijna alle brandbaar afval wordt gerecycleerd in plaats van gestort. De verbranding van 1 kg afval per dag per persoon genereert ruwweg 0,5 kWh/d/p aan elektriciteit. Ik ga ervan uit dat een vergelijkbare hoeveelheid landbouwafval ook kan worden verbrand en 0,6 kWh/d/p oplevert. [226] Voor de verbranding van dit afval is ongeveer 3 GW aan capaciteit van afvalenergiecentrales nodig, een vertienvoudiging ten opzichte van de geïnstalleerde capaciteit in 2008 (**Fig.27.2**). Londen (7 miljoen inwoners) zou dan twaalf afvalverbrandingsinstallaties van 30 MW krijgen, zoals de SELCHP-centrale in Zuid-Londen (zie blz. [307]). Birmingham (1 miljoen) zou er twee van hebben. Elke stad met 200.000 inwoners zou een vuilverbrandingsoven van 10 MW hebben.

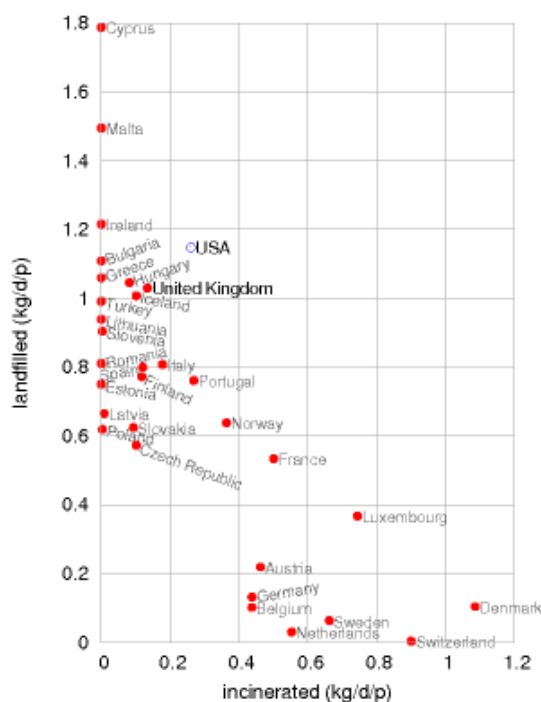
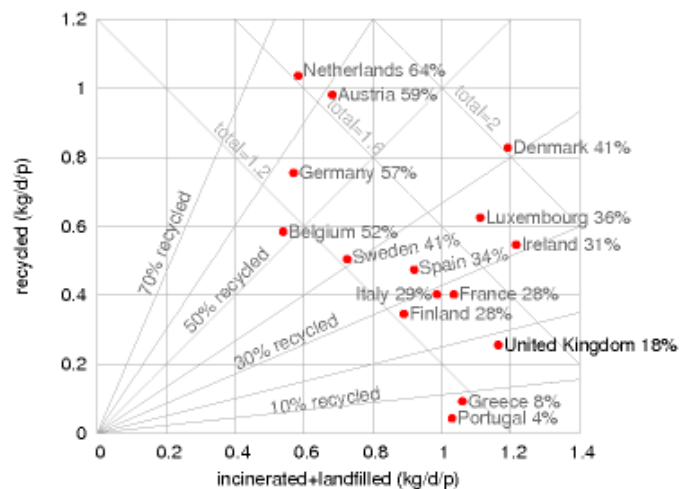


Fig.27.3: Links: Huishoudelijk afval naar stortplaats vs. afvalverbranding, in kg per dag per persoon, per land. Rechts: Gerecycleerd afval versus verbrand of gestort afval. Het recyclingpercentage in % wordt naast de naam van elk land vermeld.



De vrees dat verbranding op deze schaal moeilijk, vuil of gevaarlijk zou zijn, kan worden weggelaten door **fig.27.3**, waaruit blijkt dat veel landen in Europa veel meer afval per persoon verbranden dan Engeland; tot deze verbrandingslievende landen behoren Duitsland, Zweden, Denemarken, Nederland en Zwitserland - geen landen die gewoonlijk met hygiëneproblemen worden geassocieerd. Een positief neveneffect van verbranding is dat het vrijkomen van methaan uit stortplaatsen in de toekomst wordt voorkomen.

In alle vijf plannen levert waterkracht een bijdrage van 0,2 kWh/d/p, evenveel als nu.

Elektrische voertuigen worden gebruikt als een dynamisch aanpasbare belasting in het elektriciteitsnet. Het gemiddelde vermogen dat nodig is om elektrische auto's op te laden, bedraagt 45 GW (18 kWh/d/p). Schommelingen in hernieuwbare energiebronnen (zon en wind) kunnen worden gecompenseerd door deze belasting dienovereenkomstig te verhogen en te verlagen, zolang de schommelingen niet te groot of te langdurig zijn. De dagelijkse schommelingen in de vraag zullen groter zijn dan nu, aangezien elektriciteit de plaats inneemt van gas bij koken en verwarming (zie **Fig.26.6**). Om ervoor te zorgen dat golven in het verbruik van 10 GW over een periode van 5 uur kunnen worden opgevangen, wordt in alle vijf de plannen gepleit voor de bouw van vijf nieuwe pompaccumulatiecentrales die vergelijkbaar zijn met Dinorwig (of een gelijkwaardige verbetering van bestaande waterkrachtcentrales tot pompaccumulatiecentrales). 50 GWh aan opslagcapaciteit komt overeen met vijf Dinorwigs, elk met een nominaal vermogen van 2GW. [227] Voor sommige van de volgende plannen zal nog meer pompaccumulatie nodig zijn. Voor extra netwerkzekerheid zou elk plan een interconnector met een capaciteit van 2 GW naar Noorwegen omvatten.

Grote hoeveelheden elektriciteit opwekken - Plan D

Plan D (D staat voor binnenlandse diversiteit) maakt veel gebruik van elke in eigen land beschikbare elektriciteitsbron, en is relatief weinig afhankelijk van steun uit andere landen.

En zo komt Plan D aan de elektriciteit van 50 kWh/d/p. Wind: 8kWh/d/p (20 GW gemiddeld, 66 GW piek) (plus ongeveer 400 GWh aan gekoppelde pompaccumulatie). Fotovoltaïsche energie: 3 kWh/d/p. Afvalverbranding: 1,3 kWh/d/p ^{Q3535}. Waterkracht: 0,2 kWh/d/p. Golven: 2 kWh/d/p. Getij: 3,7 kWh/d/p. Kernenergie: 16 kWh/d/p (40 GW). "Schone steenkool": 16 kWh/d/p (40 GW).

Voor de 8 kWh/d/p aan wind is 30 keer meer nodig dan de in 2008 geïnstalleerde capaciteit. Engeland zou dan bijna drie keer meer windenergie hebben dan Duitsland nu heeft. Om deze windcapaciteit offshore te installeren in een periode van 10 jaar, zijn ongeveer 50 jackup barges nodig.

Om 3 kWh/d/p uit PV-panelen te halen is 6 m² 20% efficiënte panelen per persoon nodig. De meeste daken op het zuiden zouden dus volledig met modules worden bedekt; als alternatief zou het voor de "Verein zur Erhaltung alter Häuser" economischer en minder belastend kunnen zijn om veel van deze modules op de traditionele Beierse manier in het landschap te plaatsen (**Fig.6.7**,



Fig.27.4: Plan D

35) ^{Q35} Typefout: 1,1 kWh ??

blz. 45).

Afvalverbranding komt overeen met 1 kg huishoudelijk afval per dag per persoon (0,5 kWh/d/p) en een vergelijkbare hoeveelheid landbouwafval (0,6 kWh/d/p); waterkracht komt overeen met 0,2 kWh/d/p, evenveel als nu.

Golfenergie vereist 16.000 Pelamis-zeegolfgeneratoren die 830 km van de Atlantische kust beslaan (zie de kaart in **Fig.12.1** op blz. 82)

Getijdenenergie is afkomstig van 5 GW getijdenstroomgeneratoren, een 2 GW Severn-stuwdam en 2,5 GW getijdenlagunes, die we ook kunnen gebruiken als pomp-accumulatie.

Om 16 kWh/d/p kernenergie op te wekken is 40 GW kerncentralecapaciteit nodig, ruwweg een verviervoudiging van het centralepark van 2007. Als wij 16 kWh/d/p kernenergie zouden produceren, zouden wij ons tussen België, Finland, Frankrijk en Zweden bevinden, gemeten naar de productie per hoofd van de bevolking: België en Finland zitten op 12 kWh/d/p, Frankrijk en Zweden op respectievelijk 19 kWh/d/p en 20 kWh/d/p.

Om 16 kWh/d/p "schone steenkool" te krijgen (40 GW), zouden we onze bestaande kolencentrales, die momenteel ongeveer 30 GW leveren, moeten moderniseren met CO₂-afscheiders, waardoor hun productie tot 22 GW wordt teruggebracht, en daarnaast 18 nieuwe "schone" kolencentrales moeten bouwen. Voor deze hoeveelheid steenkool is een energie-input van ongeveer 53 kWh/d/p nodig, wat iets meer is dan wat we momenteel van alle fossiele brandstoffen in elektriciteitscentrales verbruiken, en veel meer dan wat we in hoofdstuk 23 als "duurzaam" hebben ingeschat. Dit steenkoolverbruik is ongeveer drie keer zo hoog als de huidige invoer van steenkool (18 kWh/d/p). [228] In dit plan zou, als wij de Britse steenkoolmijnen niet heropenen, 32% van de Britse elektriciteit Q36³⁶ afhankelijk zijn van ingevoerde steenkool. Heropende Britse kolenmijnen zouden ongeveer 8 kWh/d/p kunnen bijdragen, zodat Engeland in ieder geval niet zelfvoorzienend zou zijn op het gebied van kolen.

Zijn er punten in dit plan die u onredelijk of onaanvaardbaar lijken? Zo ja, dan zal misschien een van de volgende plannen uw goedkeuring wegdragen.

36) Q36 Waarbij hier als vergelijkingsbasis alleen de elektriciteit voor huishoudelijk gebruik zou kunnen zijn genomen, niet de extra geplande voor verwarming en vervoer ??

Grote hoeveelheden elektriciteit opwekken - Plan N

Plan N is het "NIMBY"-plan ^{Q3737}, voor mensen die het Engelse platteland niet willen industrialiseren met hernieuwbare energiebronnen, en ook geen nieuwe kerncentrales willen.

Eerst draaien we alle instelpunten voor hernieuwbare energie terug vanaf de hoge instellingen in Plan D. Wind 2 kWh/d/p (gemiddeld 5 GW), PV: 0, Wave: 0, Tidal: 1 kWh/d/p.

We verliezen dus 14 kWh/d/p (35 GW nationaal) in vergelijking met Plan D. (Laten we er geen doekjes om winden: de windkracht ligt nog steeds acht keer boven het niveau van 2008).

In het NIMBY-plan verlagen we kernenergie ook tot 10 kWh/d/p (25 GW) - een verlaging met 15 GW ten opzichte van Plan D, maar nog steeds een aanzienlijke verhoging ten opzichte van de huidige niveaus. Die 25 GW aan kernenergie zou, vermoed ik, kunnen worden geperst in bestaande centrales om nieuwbouw in iemands achtertuin te voorkomen. Ik laat het gedeelte schone steenkool staan op 15 kWh/d/p (40 GW), de waarde van Plan D, evenzo blijven waterkracht en afval-tot-energie staan op de waarde van Plan D.

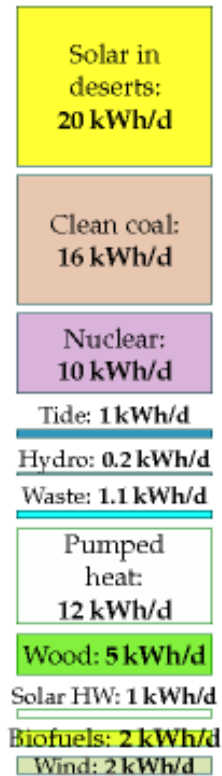


Fig.27.5: Plan N

Waar kunnen we de ontbrekende 50 GW halen? De NIMBY zegt: "Niet in mijn achtertuin, maar in die van iemand anders." Daarom betaalt het NIMBY-plan andere landen om zonne-energie uit hun woestijnen in te voeren tegen een snelheid van 20 kWh/d/p (50 GW).

Dit plan behelst de bouw van 5 blobs, elk zo groot als Londen (44 km in diameter), in de Noord-Afrikaanse woestijn, gevuld met zonne-energiecentrales. Er zijn ook transmissiesystemen nodig om 50 GW elektrische energie van daar naar Engeland te brengen. De huidige hoogspanningstransmissielijn naar Frankrijk kan 2 GW leveren. Het plan vereist dus 25 keer de capaciteit van die stroomverbinding. (Of een gelijkwaardige oplossing voor energietransport - misschien schepen gevuld met methanol of borium die tussen de woestijnkust en Engeland varen).

Omdat er minder windenergie is, hoeft Engeland ook niet de extra pompaccumulatie te bouwen die in Plan D wordt genoemd. Maar vanwege de afhankelijkheid van zonneschijn zijn er nog steeds opslagsystemen nodig om de schommelingen in de zonnestraling te compenseren. Opslag in vloeibaar zout bij zonne-energiecentrales is één optie. Ook naar pompaccumulatiecentrales in de Alpen kan worden geïnfor-

37) ^{Q37} NIMBY staat voor Not In My BackYard.

meer. Een andere mogelijkheid is om de energie om te zetten in opslagbrandstof zoals methanol, hoewel deze omzetting verliezen met zich meebrengt en er dus meer zonne-energiecentrales nodig zijn.

[229] Dit plan omvat een invoeraandeel van $32\% + 40\% = 72\%$ voor Engelse elektriciteit.

Grote hoeveelheden elektriciteit opwekken - Plan L

Sommigen zeggen: "We willen geen kernenergie!" Hoe kunnen we hen tevreden stellen? Misschien is het de taak van de anti-kernenergie-afdeling om de NIMBY-afdeling ervan te overtuigen dat zij uiteindelijk toch duurzame energie in hun achtertuin willen.

We kunnen een kernenergievrij plan krijgen door alle hernieuwbare energiebronnen uit Plan D te nemen en kernenergie één voor één te vervangen door woestijnzonne-energie. Net als in Plan N, dat een enorme toename van de capaciteit van de transmissielijnen tussen Noord-Afrika en Engeland vereist, zou de verbinding van Engeland met het vasteland moeten worden uitgebreid van 2GW tot ten minste 40GW.

Hier is het overzicht van waar Plan L de 50 kWh/d/p aan elektriciteit vandaan haalt. Wind: 8kWh/d/p (gemiddeld 20 GW) (plus ongeveer 400 GWh aan gekoppelde pompaccumulatie). Fotovoltaïsche energie: 3 kWh/d/p. Energie uit afval en waterkracht: 1,3 kWh/d/p. Golven: 2 kWh/d/p. Getij: 3,7 kWh/d/p. "Schone steenkool": 16 kWh/d/p (40 GW). Zonne-energie uit woestijngebieden: 16 kWh/d/p (40 GW).



Afb.27.6: Plan L

In dit plan wordt 64% van de elektriciteit van Engeland uit andere landen ingevoerd.

Ik noem dit plan "L" omdat het vrijwel overeenkomt met het beleid van de Liberaal-Democraten in Engeland - althans toen ik dit hoofdstuk schreef, medio 2007. Momenteel hebben zij het over "echte energieonafhankelijkheid voor Engeland", en hebben zij een CO₂-reductiebeleid uitgestippeld op grond waarvan Engeland een netto-exporteur van energie moet worden; hun beleid gaat niet in detail in op de manier waarop deze doelstellingen zullen worden bereikt.

Grote hoeveelheden elektriciteit opwekken - Plan G

Sommige mensen zeggen: "We willen geen kernenergie en we willen geen kolencentrales meer!" Dat klinkt als een waardig doel, maar we hebben een plan nodig dat het kan verwezenlijken. Ik noem het Plan "G" omdat ik vermoed dat de Groene Partij van Engeland noch kernenergie noch steenkool wil, hoewel ik vermoed dat niet alle Groenen het met de rest van mijn plan eens zullen zijn. Ook Greenpeace is, zoals ik weet, dol op wind.

Ik maak opnieuw Plan G van het oorspronkelijke scenario van Plan D, verhoog de golffractie met 1 kWh/d/p (door geld te pompen in golfonderzoek en de efficiëntie van de Pelamis-converter te verhogen) en blaas het windvermogen op met een factor 4 (ten opzichte van Plan D) tot 32 kWh/d/p, zodat windenergie 64% van de benodigde elektriciteit kan leveren. Dat is een toename van 120x het windenergievermogen van het VK boven het huidige niveau. In het kader van dit plan wordt de wereldwijde windenergie verviervoudigd en wordt de gehele toename gestationeerd op en rond de Britse eilanden.

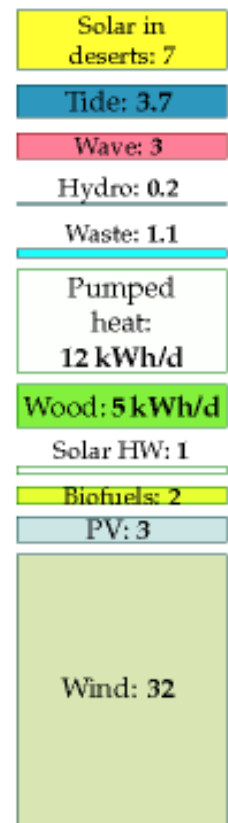
[230] Deze immense afhankelijkheid van Plan G van hernieuwbare energiebronnen, vooral wind, creëert problemen voor onze geplande methode om het elektriciteitsnet stabiel te houden, namelijk het aanpassen van de oplaadsnelheid voor miljoenen accu's voor elektrische voertuigen. In Plan G moeten we daarom voorzien in uitgebreide extra pompaccumulatie die windfluctuaties op een tijdschaal van dagen kan overbruggen. Een pompaccumulatiepotentieel van 400 Dinorwigs zou alle windenergie kunnen vervangen in het geval van een nationale windstilte van 2 dagen. Voor het vereiste opslagvolume zouden ongeveer honderd van de grootste lochs en lochs van het VK nodig zijn.

Volgens Plan G is de energieproductie als volgt verdeeld: Wind 32 kWh/d/p (gemiddeld 80 GW)) (plus ongeveer 4000 GWh aan gekoppelde pompaccumulatie). Fotovoltaïsche energie: 3 kWh/d/p. Afvalverbranding en waterkracht: 1,3 kWh/d/p. Golven: 3 kWh/d/p. Getij: 3,7 kWh/d/p. Zonne-energie uit woestijngebieden: 7 kWh/d/p (17 GW).

Dit plan ontvangt 14% van zijn elektriciteit uit andere landen.

Grote hoeveelheden elektriciteit opwekken - Plan E

E staat voor "Economy" - economische efficiëntie. Dit vijfde plan is een ruwe schatting van hoe de zaken zullen lopen in een geliberaliseerde energiemarkt met hoge CO₂-belastingen. Als er wordt gespeeld met prijseconomie, met een sterk



Afb.27.7: Plan G

prijssignaal om CO₂-emissies te vermijden, verwachten we geen brede waaier van oplossingen met een brede waaier van energiekosten, maar een winst-optimale oplossing die de vereiste energie levert tegen de laagste prijs.

En wanneer "schone steenkool" en kernenergie als prijsconcurrenten tegenover elkaar komen te staan, wint kernenergie. (Ingenieurs van een Britse "vuile" kolencentrale vertelden me dat de kapitaalkosten daar ongeveer 1 miljard euro per GW bedroegen, ongeveer evenveel als voor kernenergie; maar de kapitaalkosten voor schone kolen, inclusief CO₂-afvang en -opslag, bedroegen ongeveer 2 miljard euro). Ik nam aan dat zonne-energie in de woestijn ook de kostenconcurrentie verliest vanwege de 2000 km transportleidingen die nodig zijn (hoewel van Voorthuysen (2008) berekende dat Nobelprijswaardige ontwikkelingen in chemische brandstofproductie op zonne-energie zonnecentrales in de woestijn economisch gelijkwaardig kunnen maken aan kernenergie). Off-shore wind verliest het ook van kernenergie, maar ik ging ervan uit dat on-shore wind even duur zou zijn als kernenergie.

En zo krijgt u in Plan E de vereiste 50 kWh/d/p: wind: 4 kWh/d/p (gemiddeld 10 GW). Fotovoltaïsche energie: 0. Afvalverbranding en waterkracht: 1,3 kWh/d/p. Golven: 0. Getijden: 0,7 kWh/d/p. En kernenergie: 44 kWh/d/p (110 GW).



Fig.27.8: Plan E

Dit plan behelst een vertienvoudiging van onze kernenergieproductie ten opzichte van 2007. Engeland zou dan 110 GW hebben, ongeveer tweemaal het potentieel dat in Frankrijk bestaat. Ik heb wat getijdenenergie opgenomen omdat ik denk dat een goed geplande getijdenlagune kan concurreren met kernenergie.

Volgens dit plan importeert Engeland geen energie (behalve uranium, dat, zoals hierboven uiteengezet, normaliter niet als invoer wordt geteld).

[231] Hoe deze plannen zich verhouden tot CO₂-zuiging en luchtreizen.

In een toekomstige wereld waar CO₂-verontreiniging duur genoeg is om een catastrofale klimaatverandering te voorkomen, zal er belangstelling zijn voor planten die CO₂ tegen lage kosten uit de lucht kunnen zuigen en in een gat in de grond kunnen opslaan. Dergelijke CO₂-neutraliserende installaties zouden ons in staat kunnen stellen op 2004-niveau te vliegen met vliegtuigen die op petroleum blijven rijden.

In 2004 bedroegen de CO₂-emissies van de luchtvaart in het VK 0,5 ton CO₂ per jaar per persoon. Wanneer het totale broeikaseffect in aanmerking wordt genomen, komt dit neer op misschien 1 ton CO₂e per jaar per persoon (1 ton CO₂e, weet u

nog, staat voor broeikasgasemissies die gelijk zijn aan één ton CO₂).

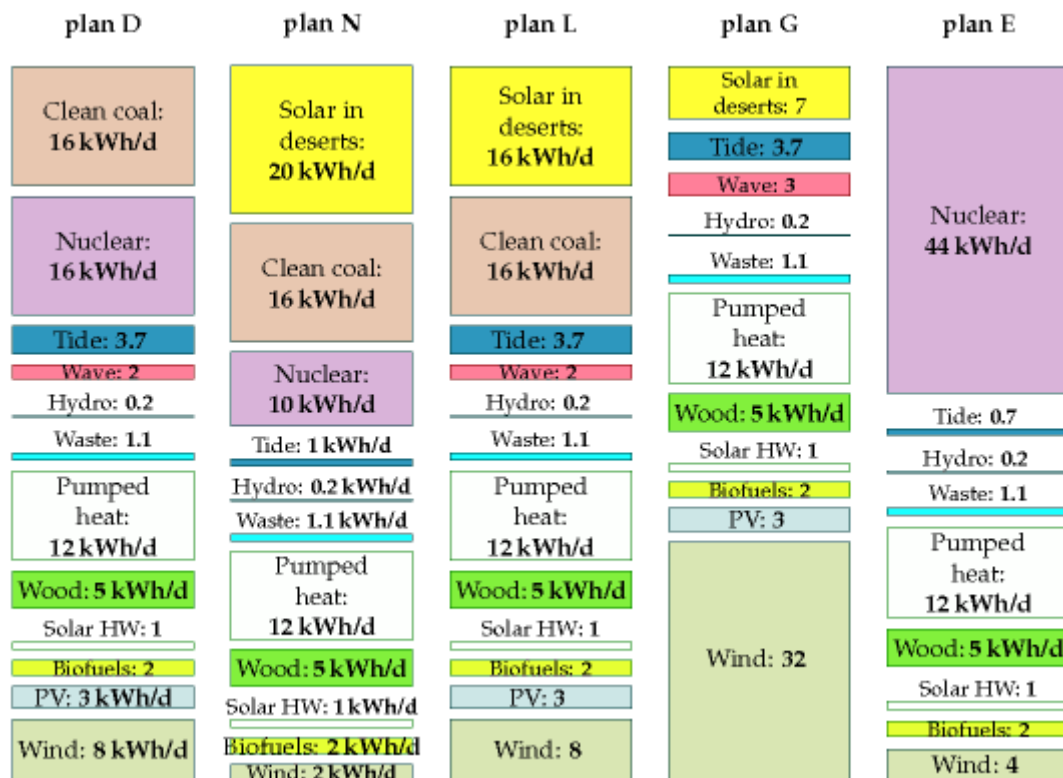


Fig.27.9 toont een vergelijking van alle vijf plannen.

In alle vijf plannen ben ik ervan uitgegaan dat een achtste van Engeland zou worden gebruikt voor de produktie van energiegewassen, die vervolgens zouden worden gebruikt voor verwarming of in WKK-centrales. Als we deze gewassen zouden omleiden naar elektriciteitscentrales met CO₂-afvang en -opslag - de "schone steenkool"-centrales die we al in drie van de plannen hebben genoemd - zou de extra afgevangen CO₂ als gevolg daarvan ongeveer 1 ton CO₂ per jaar per persoon bedragen. Als de afvalverbrandingsinstallaties (voor huishoudelijk en landbouwfval) ook bij de "schone steenkool"-centrales zouden worden geplaatst, zodat zij hun CO₂-afvang zouden kunnen delen, zou de afvang kunnen worden verhoogd tot ongeveer 2 ton CO₂ per jaar per persoon. Deze regeling zou extra kosten met zich meebrengen: de biomassa en het afval zouden verder moeten worden vervoerd, het CO₂-afvangproces zou een aanzienlijke hoeveelheid energie van de installaties vergen, en de verwarming van gebouwen zou moeten worden verzorgd door nog meer luchtwarmtepompen. Maar als CO₂-neutraliteit ons doel is, moeten we misschien vooruit plannen en proberen nieuwe "schone steenkool"-centrales met afvalverbrandingsovens te vestigen in gebieden dicht bij potentiële biomassaplantages.

"Al deze plannen zijn absurd!"

Als deze plannen je niet bevallen, verbaast me dat niet. Ik ben het met u eens dat er in elk iets onsmakelijks zit. Neem de vrijheid om een ander plan te maken dat beter

bij uw wensen past. Zorg dat het goed komt, hoor!

Misschien is uw conclusie dat een haalbaar plan een lager verbruik per hoofd van de bevolking moet omvatten. Ik zou het daarmee eens kunnen zijn, maar het is moeilijk te verkopen - denk aan de reactie van Tony Blair (blz. [249]) toen iemand hem voorstelde minder vaak op vakantie naar het buitenland te vliegen.

Je zou ook kunnen concluderen dat we een te hoge bevolkingsdichtheid hebben, en dat voor een levensvatbaar plan minder mensen nodig zijn. Nogmaals, een beleid dat moeilijk te verkopen zal zijn.

Opmerkingen en referenties

Pagina	
[225]	De verbranding van 1 kg afval per dag per persoon genereert ruwweg 0,5 kWh/d/p elektriciteit – 206 Verbranding van 1 kg afval levert ruwweg 0,5 kWh elektriciteit op. De calorische waarde van vast stedelijk afval bedraagt ongeveer 2,6 kWh per kg; elektriciteitscentrales die afval verbranden, produceren elektriciteit met een rendement van ongeveer 20%. Quelle: ZELCHP reisgids.
[226]	Fig.27.3 – 207 Figuur 27.3. Daten von Eurostat, www-epa.gov , und www-esrcsociety-today.ac.uk/ESRCInfoCentre/ .
[229]	Liberaal Democratisch beleid in Engeland – 210 Het beleid van de Liberaal-Democraten. Zie www-libdems.org.uk : [5os7dy], [yrw2oo].

28 kosten

Overweging van de kosten

Een plan op de kaart

Laten we de omvang van de plannen uit het vorige hoofdstuk duidelijker uitwerken. Laten we daarvoor eens kijken naar een kaart van Engeland waarop een zesde plan staat. Dit zesde plan ligt ongeveer in het midden van de eerste vijf, en daarom noem ik het Plan M (**Fig.28.1**).

De oppervlakte en de geschatte kosten van de vereiste installaties zijn vermeld in **Tabel.28.3**. Gemakshalve zijn de financiële kosten geraamd op basis van de huidige prijzen van vergelijkbare installaties, waarvan vele nog maar de eerste prototypes zijn. We kunnen een aanzienlijke daling van veel van deze prijzen verwachten. De ruwe kostenramingen hier hebben betrekking op de bouwkosten, niet op de afbraak- of exploitatiekosten. De persoonlijke kosten worden uit het totaal berekend door het door 60 miljoen te delen. Let wel, dit is geen boek over economie - dat zou nog eens 400 bladzijden vullen! Ik geef deze kostenramingen alleen om een zeer ruw idee te geven van het prijskaartje dat aan een dergelijk plan zal hangen dat werkt. Ik benadruk nogmaals dat ik dit specifieke plan niet verdedig - het bevat een aantal punten die ik als dictator van Engeland niet zou kiezen.

Solar in deserts: 16 kWh/d
Clean coal: 3
Nuclear: 16 kWh/d
Tide: 3.7
Wave: 0.3
Hydro: 0.2
Waste: 1.1
Pumped heat: 12 kWh/d
Wood: 5 kWh/d
Solar HW: 1
Biofuels: 2
PV: 2
Wind: 8

Afb.28.1: Plan M

Ik heb willekeurig alle beschikbare technologieën opgenomen, zodat u uw eigen plan met een andere mix kunt uitproberen. Als u bijvoorbeeld denkt dat "fotovoltaïsche energie te duur is, heb ik liever een plan met meer golfenergie", dan is er een gemakkelijke manier om daaraan tegemoet te komen: u verhoogt gewoon de golfenergiecapaciteit tot acht keer.

Als de locatie van de windmolenparken je stoort, verplaats ze dan (alleen waar?). Bedenk wel dat off-shore de kosten verhoogt. Als u minder windmolenparken wilt, geen probleem - leg dan gewoon uit welke andere technologie u in de plaats wilt. Je kunt vijf van de 100k vierkante meter windmolenparken redden als je er bijvoorbeeld nog een kerncentrale van 1 GW voor in de plaats zet. Misschien vindt u dat in dit plan (net als in de vijf andere in het vorige hoofdstuk) onevenredig veel land wordt bestemd voor biobrandstoffen. Prima: Maar dan moet u concluderen dat de

behoefte aan vloeibare drijfgassen voor het vervoer kan worden teruggebracht tot minder dan de veronderstelde 2 kWh per dag per persoon; of dat vloeibare drijfgassen op andere manieren worden geproduceerd.

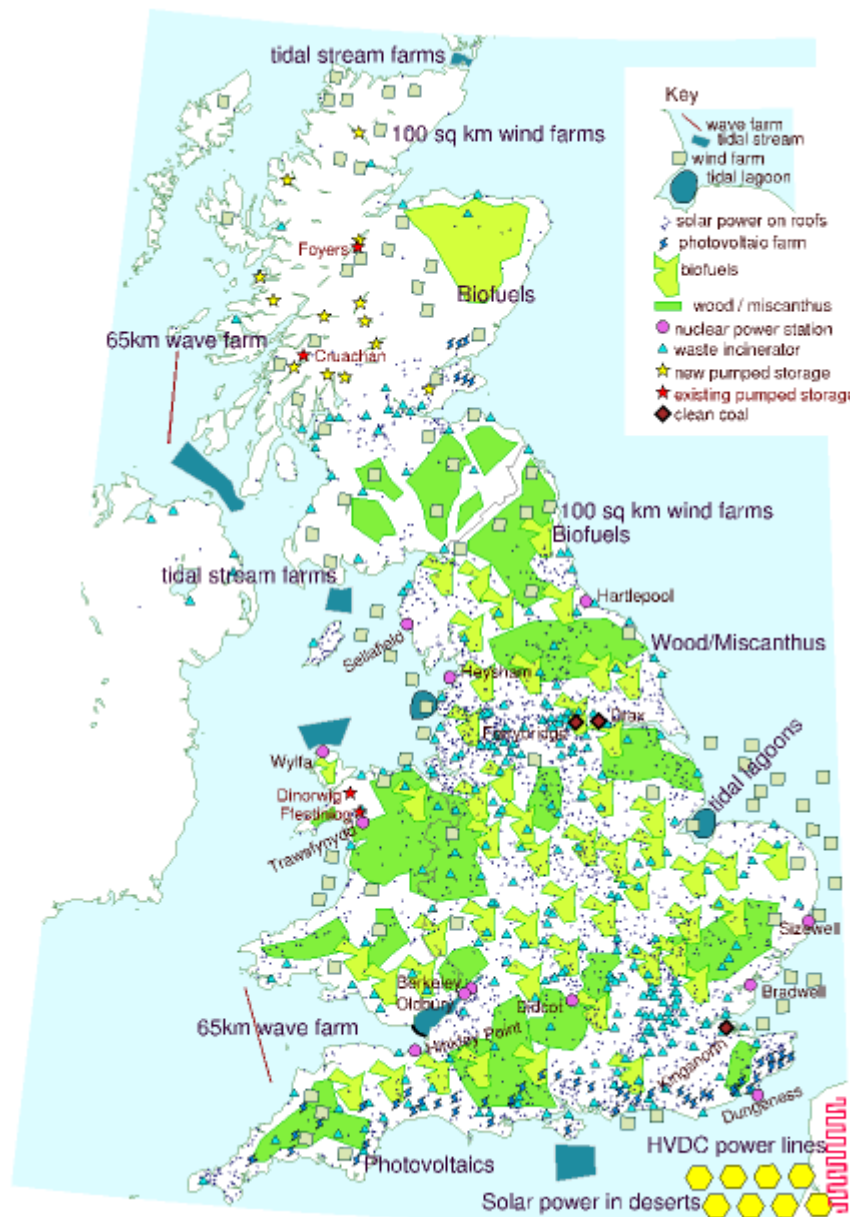


Fig.28.2: Een plan dat werkt voor Schotland, Engeland en Wales. De grijsgroene vierkantjes zijn windmolenparken. Elk is 100 km² groot en op schaal getekend. Rode lijnen in de zee zijn golfslagparken, op schaal getekend. Lichtblauwe flitsen: PV-boerderijen - elk 20 km² groot, op schaal getekend. Blauwe scherpe polygonen in de zee: getijdenkwekerijen. Blauwe belen in de zee (Blackpool en The Wash): getijdenlagunes. Groene landgebieden: Bossen en snelgroeiende energiegewassen, geelgroene gebieden: Biobrandstof, beide op schaal. Kleine blauwe driehoekjes: afvalverbranding (niet op schaal) grote bruine diamanten: "schone steenkool"-centrales, met CO₂-afscheiders, biomassa wordt meegestookt (niet op schaal). Rode stippen: Kerncentrales (niet op schaal) - 3,3 GW gemiddelde capaciteit op elk van de 12 locaties. Gele zeshoeken in het Kanaal: CSP-centrales

in afgelegen woestijnen (niet op schaal, elk 335 km²). Hoeklijn in Frankrijk vertegenwoordigt nieuwe HVDC-kabels, 2000 km lang, voor 40 GW van de woestijn naar het VK. Gele sterren in Schotland: nieuwe pompaccumulatiecentrales. Rode sterren: bestaande pompaccumulatiecentrales. Blauwe stippen: Zonnepanelen voor warm water op alle daken.

	Kapaciteit	Kostenschätzung total	pro Person	Mittlere Leis- tungsabgabe
52 on-shore Windfarmen: 35 GW 5200 km ²		£27 Mrd – auf Basis der Lewis Windfarm	£450	4,2 kWh/d/p
29 off-shore Windfarmen: 29 GW 2900 km ²		£36 Mrd – auf Basis von Kentish Flats, incl. £3 Mrd Investition in Jackup-Bargen	£650	3,5 kWh/d/p
Pumpspeicher: 15 Anlagen wie Dinorwig	30 GW	£15 Mrd	£250	
PV Freifläche: 1000 km ²	48 GW	£190 Mrd – auf Basis des Solarparks in Bayern	£3200	2 kWh/d/p
Solare Brauchwassermodule: 1 m ² Dachmodule pro Person. (60 km ² ges.)	2,5 GW(th) mittl.	£72 Mrd	£1200	1 kWh/d/p
Müllverbrennung: 100 neue 30-MW-Kraftwerke:	3 GW	£8,5 Mrd – auf Basis von SELCHP	£140	1,1 kWh/d/p
Wärmepumpen	210 GW(th)	£60 Mrd	£1000	12 kWh/d/p
Wellenfarmen – 2500 Pelamis, 130 km Meer	1,9 GW (0,76 GW mittl.)	£6 Mrd?	£100	0,3 kWh/d/p
Severn Sperrwerk: 550 km ²	8 GW (2 GW mittl.)	£15 Mrd	£250	0,8 kWh/d/p
Tidenlagunen: 800 km ²	1,75GW mittl.	£2,6 Mrd?	£45	0,7 kWh/d/p
Gezeitenstrom: 15 000 Turbinen – 2000 km ²	18 GW (5,5 GW mittl.)	£21 Mrd?	£350	2,2 kWh/d/p
Kernkraft: 40 AKWs	45 GW	£60 Mrd – auf Basis von Olkiluoto, Finland	£1000	16 kWh/d/p
“Clean Coal”	8 GW	£16 Mrd	£270	3 kWh/d/p
Concentrating solar in deserts: 2700 km ² power	40 GW mittl.	£340 Mrd – auf Basis von Solucar	£5700	16 kWh/d/p
Land in Europa für 1600 km HVDC Kabeltrasse: 1200 km ²	50 GW	£1 Mrd	£15	
2000 km HVDC Kabel	50 GW	£1 Mrd – auf Basis von Schätzungen des German Aerospace Center	£15	
Biotreibstoff: 30 000 km ²		(Kosten nicht bekannt)		2 kWh/d/p
Holz/Miscanthus: 31.000 km ²		(Kosten nicht bekannt)		5 kWh/d/p

Tabel 28.3: Benodigde land- en zeeoppervlakte voor Plan M, en ruwe kostenraming. Kosten met vraagtekens geven technologieën aan waarvan de kosten niet exact beschikbaar zijn op basis van bestaande prototypes "1GW(th)" betekent één GW thermische capaciteit

De kosten van de omschakeling van fossiele brandstoffen op hernieuwbare energiebronnen

Elk windmolenpark kost een paar miljoen om te bouwen en levert een paar megawatt. Als een zeer ruw huisgetal voor 2008: één watt aan windvermogen kost één euro om te installeren; één kilowatt kost 1000 euro; één megawatt kost een miljoen; één gigawatt kost een miljard of misschien twee. Andere hernieuwbare energiebronnen zijn duurder. Wij (in Engeland) verbruiken momenteel een totale capaciteit van ongeveer 300 GW aan hernieuwbare energiebronnen en/of kernenergie en hebben derhalve activawaarden (kosten) in de orde van grootte van 300 miljard. [234] De kostenramingen in **Tabel.28.3** komen in totaal op 870 miljard, waarbij zonne-energie de kosten domineert - zon-PV kost 190 miljard en CSP kost 340 miljard. Beide kostenposten kunnen drastisch dalen als we - "al doende leert men" - deze technologieën opschalen. In een intern overheidsrapport dat in augustus 2007 uitlekte naar *de Guardian*, werd geraamd dat het bereiken van "20% tegen 2020" (d.w.z. 20% van de totale energie uit hernieuwbare energiebronnen, wat overeenkomt met 80 GW aan hernieuwbare energiebronnen) "tot 22 miljard" zou kunnen kosten (wat neerkomt op een gemiddelde van 1,7 miljard per jaar). Hoewel deze raming nog steeds minder is dan de 80 miljard die ik zojuist als vuistregel heb genoemd, beschouwden de auteurs van dit uitgelekte rapport deze 22 miljard als een "onevenredige" kostenpost, en gaven zij de voorkeur aan een streefcijfer van 9% duurzame energie. (Een andere reden die u aanvoerde als tegenargument voor "20% tegen 2020" was dat de daaruit voortvloeiende broeikasgasreducties "de EU-aanpak van de handel in emissierechten overbodig dreigen te maken" - een verschrikkelijke gedachte!)

[236] Andere dingen die miljarden kosten.

Miljarden zijn grote getallen en het is moeilijk om er een gevoel voor te krijgen. Om de kosten van de geleidelijke afschaffing van fossiele brandstoffen in perspectief te plaatsen, kan het helpen om andere zaken op te sommen die ook miljarden, of miljarden per jaar kosten. Ik zal ook veel van deze uitgaven omrekenen "per persoon" door het totaal te delen door de toegewezen bevolking.

Het meest relevante cijfer om te vergelijken is misschien wel het geld dat we nu al elk jaar aan energie uitgeven. In Engeland betalen de eindgebruikers 754 miljard per jaar voor energie, en het totale marktvolume van verbruikte energie bedraagt 130 miljard per jaar. In dit licht bezien is het idee om jaarlijks 1,7 miljard euro extra uit te geven als investering in de



Afb.28.4: De snelweg M1, van knooppunt 21 tot 30

toekomstige energie-infrastructuur helemaal niet "onevenredig" - het gaat om minder dan 3% van de huidige energie-uitgaven.

Een ander goed vergelijkingspunt zijn de jaarlijkse uitgaven voor verzekeringen: Sommige van de investeringen die wij moeten doen, bieden geen zekerheid van terugbetaling - net als verzekeringen. Particulieren en bedrijven betalen in Engeland 90 miljard per jaar aan verzekeringen.

Subsidies

56 miljard £ over 25 jaar: de kosten van de ontmanteling van Britse kerncentrales en kernwapenfabrieken. Dit zijn de cijfers van 2004. In 2008 was het 73 miljard (1.200£ per persoon in het VK). [6eoyhg]

Vervoer

4,3 miljard £: de kosten van Terminal 5 op de Londense luchthaven Heathrow. (72 £ per persoon in het VK).

1,9 miljard £: de kosten van de verbreding van de snelweg M1 (tussen knooppunten 21 en 30, **Afb.28.4**). [yu8em5]. (32 £ per persoon in het VK).

Speciale evenementen

Kosten Olympische Spelen Londen 2012: 2,4 miljard £; nee, sorry, 5 miljard [3x2-cr4]; of misschien 9 miljard [2dd4mz]. (150 £ per persoon in het VK).

Normale bedrijfsuitoefening.

2,5 miljard pond per jaar: Tesco's winst (aangekondigd in 2007). (42 pond per jaar per persoon in het VK).

10,2 miljard pond per jaar: Uitgaven door Britten aan voedsel dat zij kopen maar niet eten. (£170 per jaar per persoon in UK)

11 miljard pond per jaar: de winst van BP (2006).

13 miljard pond per jaar: winst van Royal Dutch Shell (2006).

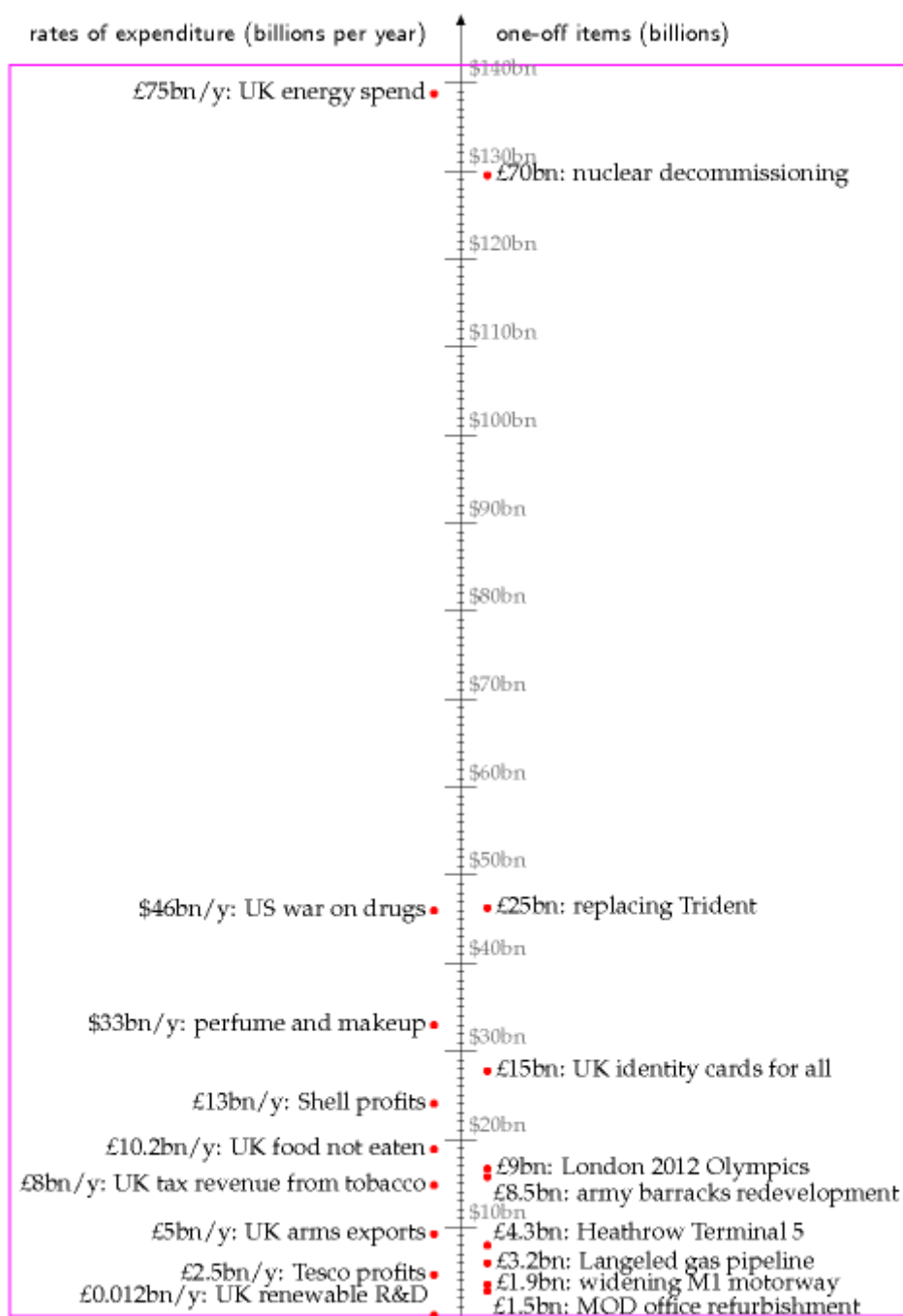
40 miljard dollar per jaar: de winst van Exxon (2006).

33 miljard dollar per jaar: wereldwijde uitgaven voor parfum en make-up.

\$700 miljard/j: uitgaven in de VS voor buitenlandse olie (2008). (\$2300 per jaar per persoon in de VS).

[237] Normale regeringsactiviteiten

1,5 miljard pond: Opknepkosten kantoren Ministerie van Defensie (Private Eye nr. 1176, 19 januari 2007, blz. 5) (25 pond per persoon in UK) 15 miljard pond: Kosten van de invoering van de nieuwe identiteitskaart [7vlxp]. (£250 per persoon)



Figuur 28.5. Dingen die in de miljarden lopen. De schaal in het midden heeft grote tikken met tussenpozen van 10 miljard dollar en kleine tikken met tussenpozen van 1 miljard dollar.

Plannen voor de toekomst

3,2 miljard pond: Kosten van de Langeled-pijpleiding die gas van Noorse producenten naar het VK brengt. De capaciteit van de pijpleiding is 20 bcm per jaar, wat overeenkomt met 25 GW. [6x4nvv] [39g2wz] [3ac8sj]. (53 pond per persoon in het VK)

[238] *Tabaksaccijns en soortgelijke spellen.*

8 miljard pond/j: Jaarlijkse inkomsten uit tabaksaccijnzen in Engeland [j7kg26]. (130 pond per jaar per persoon in het VK) De EU geeft bijna 1 miljard euro subsidie aan de tabaksindustrie. www-ash.org.uk 46 miljard dollar per jaar: jaarlijkse kosten van de "oorlog tegen drugs" in de VS [r9fcf] (150 dollar per jaar per persoon in de VS)

Ruimte

\$1,7 miljard: De kosten van een space shuttle (\$6 per persoon in de VS).

Banken

\$700 miljard: In oktober 2008, keurde de Amerikaanse regering 700 miljard dollar goed om Wall Street te redden, en...

500 miljard pond goedgekeurd door de Britse regering om de Britse banken te redden.

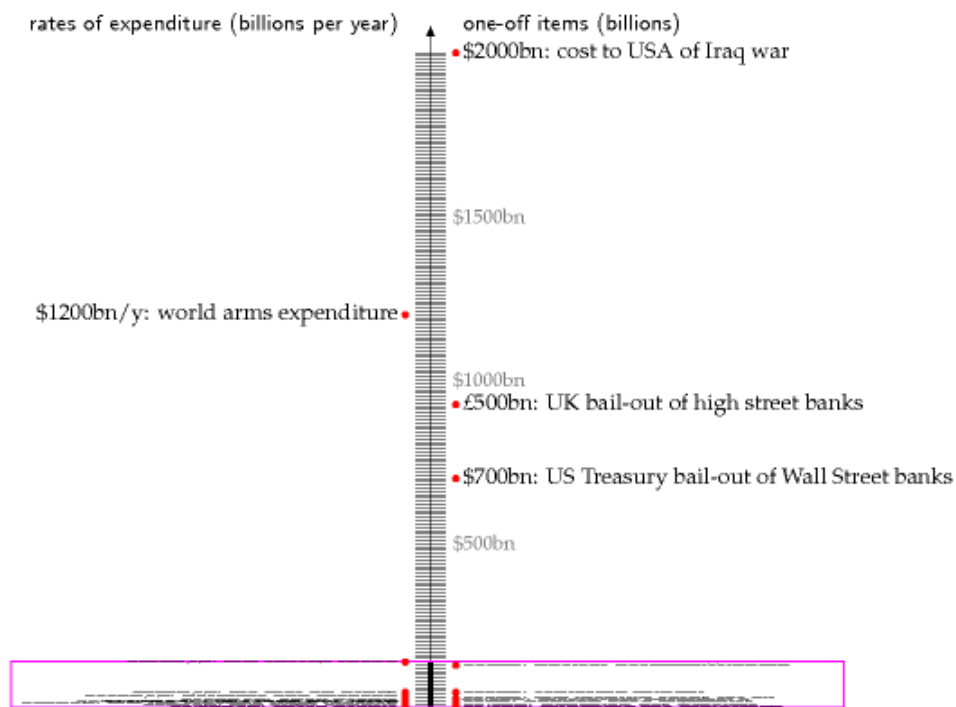


Fig.28.6: Enkele andere dingen die in de miljarden lopen. De verticale as is 20 keer samengedrukt in vergelijking met Fig.28.5, die op schaal is getekend als een rechthoek in magenta. Dubbel?

Militairen

5 miljard pond per jaar: Britse wapenexport (83 pond per jaar per inwoner van het VK), waarvan 2,5 miljard pond naar het Midden-Oosten gaat en 1 miljard pond

naar Saoedi-Arabië. Bron: Observer, 3 december 2006.

8,5 miljard pond: Kosten van herontwikkeling van kazernes in Aldershot en Salisbury Plain. (£140 per persoon in UK)

3,8 miljard pond: de kosten van twee nieuwe vliegdekschepen (63 pond per persoon in het VK). news.bbc.co.uk/1/low/scotland/6914788.stm [239]

4,5 miljard dollar per jaar: de kosten van het niet bouwen van kernwapens - de begroting van het ministerie van Energie omvat ten minste 4,5 miljard dollar per jaar voor het "in stand houden van de voorraad" kernwapens zonder kernproeven en zonder grote productie van nieuwe wapens. (\$15 per jaar per persoon in Amerika)

10-25 miljard pond: De kosten van de vervanging van Trident, het nucleaire defensiesysteem van het Verenigd Koninkrijk. (£170-420 per persoon in UK) [ysncks].

63 miljard dollar: Amerikaanse donatie van "militaire hulp" (d.w.z. wapens) aan het Midden-Oosten over 10 jaar - ongeveer de helft aan Israël, de helft aan de Arabische staten. [2vq59t] (\$210 per persoon in de VS)

\$1200 miljard per jaar: wereldwijde uitgaven aan wapens [ym46a9]. (\$200 per jaar per persoon wereldwijd.)

\$2000 miljard of meer: de Amerikaanse kosten van de [99bpt] Irak-oorlog, volgens Nobelprijswinnaar econoom Joseph Stiglitz. (\$7000 per persoon in Amerika.)

Volgens het Stern-rapport bedragen de kosten om de klimaatverandering af te wenden (als we nu handelen) wereldwijd \$440 miljard per jaar (\$440 per jaar per persoon indien gelijkelijk verdeeld over de 1 miljard rijkste mensen). In 2005 gaf de Britse regering alleen al 480 miljard dollar uit aan oorlog en oorlogsvoorbereidingen. De totale militaire uitgaven van de 15 leidende landen bedroegen 840 miljard dollar.

Uitgaven die niet in de miljarden lopen

0,012 miljard pond per jaar: de kleinste bijdrage die in **fig.28.5** wordt getoond zijn de jaarlijkse overheidsuitgaven voor onderzoek en ontwikkeling op het gebied van duurzame energie. (0,20 pond per persoon in het VK, per jaar).

Opmerkingen en referenties

Pagina	
[234]	Fig.28.2: – 215Figuur 28.2 Ik heb aangenomen dat zonneparken een vermogensdichtheid van 5 W/m ² hebben, wat overeenkomt met het zonnepark in Beieren van blz. 45, dus elk park op de kaart levert gemiddeld 100 MW. De totale gemiddelde productie zou 5 GW bedragen, waarvoor ongeveer 50 GW(piek)capaciteit nodig is (dat is 16 maal de in 2006 in Duitsland geïnstalleerde capaciteit). De gele zeshoeken van CSP-centrales hebben elk een gemiddeld vermogen van 5 GW. Er zijn twee van hen nodig om een "klodder" van hoofdstuk 25 te leveren.
[234]	Een intern regeringsrapport gelekt aan de Guardian in augustus 2007 – 217 Een regeringsrapport gelekt door de Guardian.... In de Guardian van 13 augustus 2007 stond te lezen [2bmuod] "Regeringsambtenaren hebben ministers in vertrouwen verteld dat Engeland niet kan hopen in de buurt te komen van de EU-doelstelling voor hernieuwbare energie die in het voorjaar door Tony Blair is ondertekend - en hebben hen geadviseerd manieren te vinden om er onderuit te komen". Het geciteerde document is te vinden op [3g8nn8].
[236]	wereldwijde inspanning voor parfum - 219... parfum... Quelle: Worldwatch Institute www-worldwatch.org/press/news/2004/01/07/
[239]	voor oorlog en oorlogsvoorbereidingen - 221...oorlogen en voorbereiding op oorlogen... www-conscienceonline.org.uk [240]
[239]	jaarlijkse overheidsuitgaven voor onderzoek en ontwikkeling op het gebied van hernieuwbare energie – Overheidsinvesteringen in onderzoek en ontwikkeling op het gebied van hernieuwbare energie. In 2002-2003 bedroegen de overheidssubsidies voor O&O op het gebied van hernieuwbare energie 12,2 miljoen pond. Bron: House of Lords Science and Technology Committee, 4th Report of Session 2003-04. [3jo7q2] Verhoudingsgewijs is er weinig geld uitgetrokken voor het Programma voor koolstofarme gebouwen: 0,018 miljard pond per jaar, verdeeld over wind, biomassa, thermische zonne-energie en PV, grondwarmtepompen, kleine waterkrachtcentrales en WKK.

29 wat nu

Wat nu te doen?

Tenzij wij nu handelen, niet over enige tijd maar nu, zullen deze gevolgen, hoe rampzalig ook, onomkeerbaar zijn. Er is dus niets ernstigers, urgenter of veeleisender dan leiderschap.

Tony Blair, 30 oktober 2006

een beetje onpraktisch eigenlijk. . .

Tony Blair, twee maanden later, in reactie op de suggestie dat hij leiderschap zou moeten tonen door niet naar Barbados te vliegen voor vakantie.

Wat we moeten doen hangt gedeeltelijk af van onze beweegredenen. Op bladzijde [005] hebben we drie redenen besproken om fossiele brandstoffen geleidelijk uit te bannen: het einde van goedkope brandstof, voorzieningszekerheid en klimaatverandering. Laten we er eerst van uitgaan dat we gemotiveerd zijn door de klimaatverandering - dat we onze CO₂-uitstoot radicaal willen verminderen. (Iedereen die niet in klimaatverandering gelooft, kan dit hoofdstuk overslaan en zich op blz. [242] weer bij de rest van ons voegen).

Wat te doen aan CO₂-vervuiling.

We zijn niet op weg naar een CO₂-vrije toekomst. Hierop wordt niet op lange termijn geïnvesteerd. CO₂-sequestratiebedrijven floreren niet, hoewel het advies van zowel klimaatdeskundigen als economen suggereert dat het wegzuigen van kooldioxide uit de lucht waarschijnlijk noodzakelijk zal zijn om een gevaarlijke klimaatverandering af te wenden. CO₂ wordt ook in geen enkele kolengestookte centrale uitgefilterd (behalve in een kleine experimentele centrale in Duitsland).

Waarom niet?

Het voornaamste probleem is dat de prijs van CO₂-verontreiniging niet juist is. En er is geen bewijs dat het in de toekomst goed geprijsd zal zijn. Als ik zeg "correct geprijsd", bedoel ik dat de prijs van CO₂-emissies hoog genoeg moet zijn om het de moeite waard te maken voor elke bestaande kolengestookte elektriciteitscentrale om zich uit te rusten met CO₂-afvangapparatuur.

Het oplossen van het klimaatprobleem is een moeilijke opgave, maar in één ruwe penseelstreek schetst de oplossing zich als volgt: De prijs van CO₂ moet zo hoog

zijn dat de mensen stoppen met het verbranden van steenkool zonder CO₂-opvang. Een groot deel van de oplossing is in die schets vervat, want op lange termijn is steenkool de grote fossiele brandstof. (Pogingen om de uitstoot van olie en gas te verminderen zijn van secundair belang, omdat olie en gas de komende 50 jaar naar verwachting toch zullen afnemen).

Dus wat moeten politici doen? Zij moeten ervoor zorgen dat alle kolengestookte elektriciteitscentrales CO₂-afvanginstallaties installeren. De eerste stap om dit doel te bereiken zou zijn dat de overheid een grootschalig demonstratieproject financiert om de juiste technologie voor koolstofafvang en -opslag (CCS) te vinden; ten tweede zouden de politici de langetermijnregelgeving voor elektriciteitscentrales moeten wijzigen zodat overal geperfectioneerde CCS-technologie wordt gebruikt. Mijn naïeve idee van deze tweede stap is een wet aan te nemen die bepaalt dat - vanaf een bepaalde einddatum - alle kolengestookte elektriciteitscentrales CCS moeten gebruiken. [242] Maar sommige Democratische politici schijnen te denken dat de manier om een schuurdeur te sluiten is door een markt voor vrijstellingen te creëren om de schuurdeur open te laten. Maar als we het dogma volgen dat het klimaatprobleem door de markt moet worden opgelost, wat zou dan de marktgestuurde manier zijn om ons eenvoudige doel te bereiken - dat alle kolencentrales CCS hebben? Ja, we kunnen CO₂ verhandelen - rechten om CO₂ uit te stoten en rechten om CO₂ af te vangen verhandelen, en die twee tegen elkaar inwisselbaar maken. Exploitanten van kolengestookte elektriciteitscentrales zullen echter alleen in CCS investeren als zij ervan overtuigd zijn dat de prijs van CO₂ hoog genoeg zal zijn om de CCS-installatie zichzelf te laten terugverdienen. Deskundigen zeggen dat dit kan worden bereikt met een gegarandeerde CO₂-prijs op lange termijn van ongeveer 100 dollar per ton CO₂.

De beleidsmakers zouden het dus eens moeten worden over CO₂-reductiedoelstellingen op lange termijn die sterk genoeg zijn om potentiële investeerders het vertrouwen te geven dat de prijs van CO₂ blijvend zal stijgen tot ten minste 100 dollar per ton CO₂. Een andere mogelijkheid is dat zij emissierechten uitgeven op veiligen met een vast minimumbod. Een andere manier zou zijn dat regeringen investeringen in CCS garanderen door te garanderen dat zij de CO₂-afvangrechten altijd



Fig.29.1: *Dat heeft veel goeds gedaan! De prijs van een ton CO₂, in euro's, tijdens de eerste periode van de Europese regeling voor de handel in emissierechten. Bron www-eex.com (!nee dus, zie tekst.)*

tegen 100 dollar per ton zullen inruilen, ongeacht wat er op de emissiemarkt gebeurt.

Ik vraag me nog steeds af of het niet verstandiger zou zijn de schuurdeur rechtstreeks te sluiten, in plaats van te knoeien met een internationale markt die alleen maar in het leven is geroepen om het sluiten van de schuurdeur aan te moedigen.

Het Britse energiebeleid klopt gewoon niet. Het zorgt niet voor veiligheid. Het zal onze verplichtingen inzake klimaatverandering niet nakomen. Het voldoet niet aan wat 's werelds armste landen nodig hebben.

Lord Patten of Barnes, voorzitter van de Oxford University task force on energy and climate change, 4 juni 2007.

Wat te doen met de energievoorziening

Laten we onze motieven nu eens verruimen en aannemen dat we van fossiele brandstoffen af willen om de betrouwbaarheid van de energievoorziening veilig te stellen.

Wat moeten we doen om niet-fossiele energievoorziening en efficiëntiemaatregelen te bevorderen? Eén houding is "laat de markt het maar uitzoeken". Zodra fossiele brandstoffen duur worden, zullen hernieuwbare energiebronnen en kernenergie in verhouding tot die brandstoffen goedkoper worden, en de slimme consument zal de voorkeur geven aan efficiënte technologieën". Ik vind het vreemd dat mensen zoveel vertrouwen hebben in de markt, gezien de regelmaat waarmee de markten ons ups en downs, kredietcrises en bankfaillissementen bezorgen. 243] Markten zijn misschien goed voor kortetermijnbeslissingen - voor investeringen die binnen een jaar of tien renderen - maar kunnen we verwachten dat markten goed werk leveren voor beslissingen over energie, beslissingen waarvan de effecten vele decennia of eeuwen duren?

Als we de vrije markt huizen laten bouwen, krijgen we huizen die slecht geïsoleerd zijn. Moderne huizen worden alleen maar energie-efficiënter dankzij wetgeving.

[244] De vrije markt is ook niet verantwoordelijk voor de aanleg van wegen en spoorwegen, busroutes, parkeerplaatsen en fietspaden. Maar wegeaanleg en parkeervoorzieningen hebben een aanzienlijke invloed op de vervoersmogelijkheden van mensen. Ruimtelijke ordening, die bepaalt waar huizen en werkplekken worden gebouwd en hoe dicht de huizen op elkaar worden gepakt, heeft ook een overweldigende invloed op de toekomstige vervoerspatronen van mensen. Als een nieuwe stad wordt gebouwd zonder treinstation, is het onwaarschijnlijk dat de bewoners langeafstandsreizen per trein zullen maken. Als woon- en werkplaats meer dan een

paar kilometer van elkaar verwijderd zijn, zullen veel mensen weinig andere keuze hebben dan met de auto naar het werk te gaan.

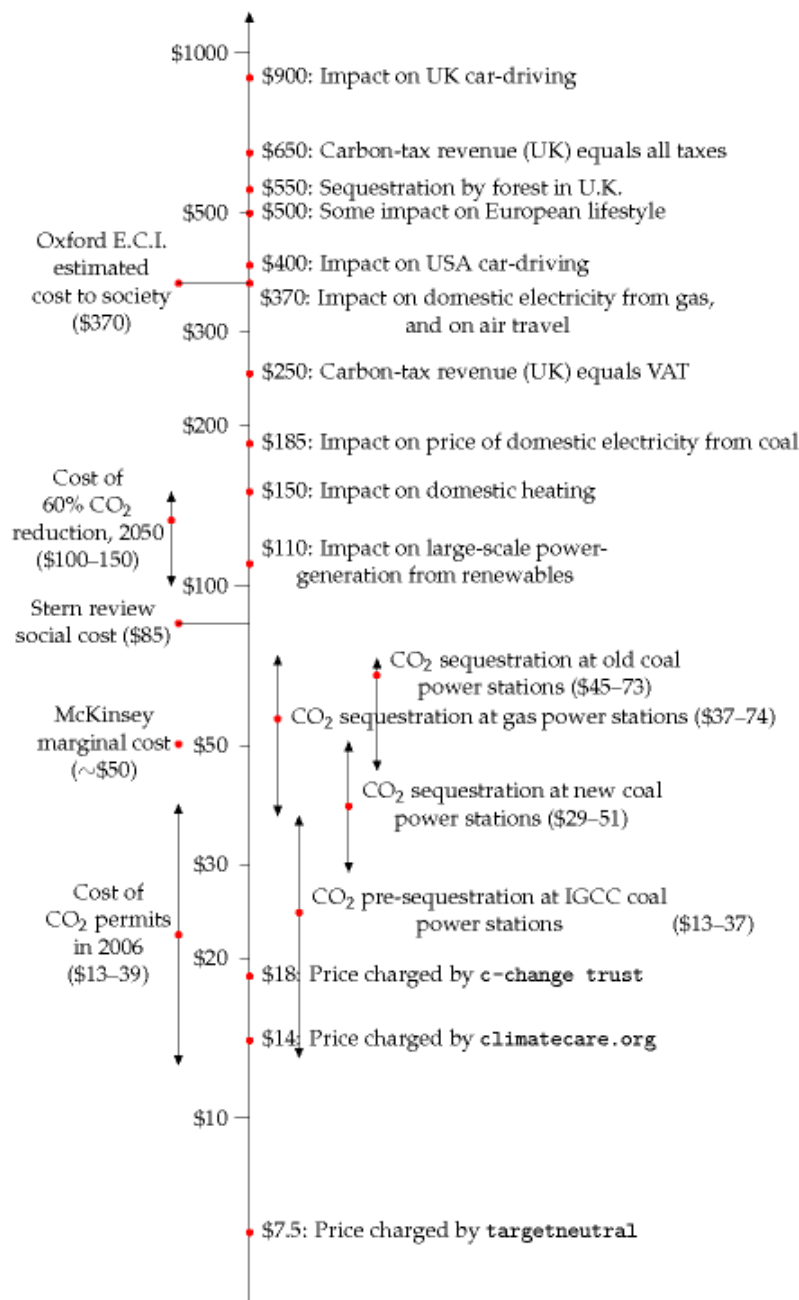


Fig.29.2: Welke prijs zou CO₂ moeten hebben opdat de samenleving de CO₂-vervuiling significant zou veranderen? Het diagram toont de CO₂-kosten per ton waarbij bepaalde investeringen economisch worden, of bepaalde gedragingen aanzienlijk worden beïnvloed, waarbij een gedraging zoals vliegen of autorijden als "beïnvloed" wordt beschouwd wanneer de CO₂-prijzen de kosten van de gedraging verdubbelen. Als de kosten stijgen tot 20-70 dollar/ton, wordt CCS economisch verantwoord voor nieuwe en bestaande kolencentrales. Een prijs van 100 \$/ton zou langetermijnprojecten voor duurzame elektriciteit, die momenteel 3 Ct/kWh duurder zijn dan gas, van luchtkastelen tot financieel levensvatbare ondernemingen maken. De voorgestelde Severn-dam, bijvoorbeeld, zou getijdenenergie kunnen leveren tegen ongeveer 6 Ct/kWh, wat 3,3 Ct boven de huidige elektriciteitsprijs van 2,7 Ct/kWh is. Als elke 1000 kWh van de dam 1 ton CO₂ ter waarde van 60£/t vermijdt, zou de Severn-dam zichzelf meer dan terugbetalen. Bij een prijs van \$150/t zouden huishoudens die gas gebruiken, de CO₂-kosten op hun verwarmingsfac-

tuur merken. Een prijs van 250 dollar per ton zou de effectieve kostprijs van 1 vat olie met 100 dollar doen stijgen. Bij 500 dollar per ton CO₂ zou de wens van de mensen om te vliegen aanzienlijk afnemen. Bij een prijs van 500 dollar per ton zou de gemiddelde Europeaan die zijn levensstijl niet wijzigt 12% van zijn inkomen besteden aan CO₂-kosten voor auto's, vliegereizen en gasverwarming. En bij 900 dollar per ton zou de stijging van de kosten voor het besturen van een auto merkbaar zijn.

Een van de grootste verbruikers van energie is de productie van goederen; in een vrije markt voorzien veel fabrikanten ons van goederen die al een geplande veroudering hebben, goederen die moeten worden weggegooid en vervangen, zodat de

fabrikant meer zaken kan doen.

Hoewel de markten een zekere rol kunnen spelen, is het dwaas te zeggen "laat de markten alles doen". We zullen het zeker moeten hebben over wetgeving, regelgeving en belastingen.

Het groene belastingstelsel

Wij moeten al onze belastingen en heffingen grondig herzien. Het doel is om vervuiling - met name fossiele brandstoffen - zwaarder te belasten en arbeid minder.

Nicolas Sarkozy, president van Frankrijk

Op dit moment is het veel goedkoper om een nieuwe magnetron, dvd-speler of stofzuiger te kopen dan om een kapotte te repareren. Dit is gekkenwerk.

Deze waanzin wordt ten dele veroorzaakt door ons belastingstelsel, dat de arbeid van de magnetronhersteller belast en zijn zaak onoverzichtelijk maakt door tijdrovend papierwerk. Hij doet iets goeds, hij repareert mijn magnetron! - Maar het belastingstelsel maakt zijn zaken moeilijker.

Het idee van het groene belastingstelsel is om belastingen te verschuiven van goede dingen zoals werk naar slechte dingen zoals aantasting van het milieu. Voorstanders van milieubelastinghervorming stellen voor om belastingverlagingen op de "goede" zaken te compenseren met gelijkwaardige belastingverhogingen op de "slechte" zaken, zodat de totale belastinghervorming kostenneutraal blijft.

CO₂ emissie belasting

De belangrijkste belasting die we moeten heffen om technologieën zonder fossiele brandstoffen aan te moedigen, is de ecotaks op CO₂-emissies. De prijs voor CO₂ moet hoog genoeg zijn om investeringen in alternatieven voor fossiele brandstoffen en investeringen in efficiëntiemaatregelen aan te moedigen. Zoals u opmerkt, is dit precies hetzelfde beleid als in het vorige punt. Of onze motivatie nu voortkomt uit het klimaatprobleem of uit bezorgdheid over de continuïteit van de voorziening, het beleidsresultaat is hetzelfde: we hebben een CO₂-prijs nodig die stabiel en hoog is. **Fig.29.2** toont, zeer globaal, de CO₂-prijzen die vereist zijn voor verschillende gedragsveranderingen of investeringen; en de veel lagere prijzen die door verschillende organisaties worden gevraagd om broeikasgasemissies te "compenseren". Wat is de beste manier om een hoge koolstofprijs te organiseren? Is de EU-handel in emissierechten (**Fig.29.1**) een levensvatbare weg vooruit? [245] Deze vraag behoort tot de expertise van economen en internationale beleidsdeskundigen. De economen Michael Grubb en David Newbery van Cambridge zijn van mening dat de handel in

emissierechten in de EU niet werkt - "de bestaande instrumenten slagen er niet in voldoende effect te sorteren op de investeringen".

The Economist pleit voor groene belastingen als het belangrijkste mechanisme voor overheidssteun voor schone energie. De Groep Kwaliteit van het Leven van de Conservatieve Partij van Engeland roept ook op tot verhoging van milieubelastingen en verlaging van andere belastingen - "verschuiving van belastingheffing van 'betalen voor wat je verdient' naar 'betalen voor wat je verbrandt'". De Royal Commission on Environmental Pollution zegt ook dat Engeland een ecotaks moet invoeren: "Die moet bij de bron beginnen en alle sectoren bestrijken".

Er is dus duidelijk steun voor een hoge groene belasting, vergezeld van verlagingen van de inkomstenbelasting, de vennootschapsbelasting en de BTW. Maar belastingen en markten alleen zullen niet alle maatregelen opleveren die nodig zijn. De belasting- en marktbenadering faalt wanneer consumenten soms irrationele beslissingen nemen, wanneer consumenten geld op korte termijn belangrijker vinden dan besparingen op lange termijn, of wanneer iemand bij het nemen van een aankoopbeslissing niet alle kosten in aanmerking neemt.

Inderdaad, veel merken zijn "geruststellend duur". Aankoopbeslissingen worden niet alleen door prijssignalen gestuurd. Veel consumenten kijken meer naar imago en herkenning, en sommigen kopen opzettelijk dure dingen.

Als een inefficiënt ding eenmaal is aangeschaft, is het te laat. Het is van cruciaal belang dat inefficiënte dingen in de eerste plaats niet worden gemaakt of dat de consument bij zijn aankopen wordt aangespoord om geen inefficiënte dingen te kopen.

Hier zijn nog enkele voorbeelden van waar de vrije markt faalt.

De toetredingsdrempel

Stelt u zich eens voor dat de belastingen zo hoog zijn dat een nieuw superduper CO₂-vrij dingamajig 5% minder kost dan zijn reeds lang bestaande CO₂-beladen rival, het dino-dingamajig, als het in dezelfde hoeveelheid in massaproductie kan worden genomen. Dankzij slimme technologie is de CO₂-uitstoot van het eco-dingetje 90% lager dan het dino-dingetje. Het zou duidelijk goed zijn voor de maatschappij als iedereen nu eco-thingsies kocht. Maar op dit ogenblik is de verkoop van het eco-dingetje laag, en daarom is de kostprijs per eenheid hoger dan het dino-dingetje. Slechts een paar natuurliefhebbers en progressieven kopen de eco-thingamabob, en eco-thingamabob Inc. trekt zich terug uit de markt.

Misschien is overheidsingrijpen nodig om de overgang te oliën en innovatie een

kans te geven. Steun voor onderzoek en ontwikkeling? Belastingvoordelen die het nieuwe product bevoordelen (zoals de belastingvoordelen die de overgang van gelode naar ongelode benzine "olieachtig" hebben gemaakt)?

Het probleem van kleine kostenverschillen

Stel dat eco-thingy Inc. het heeft gemaakt van kikkervisje tot kikker, en dat de ecotaks hoog genoeg is dat het eco-thingy eigenlijk 5% minder kost dan zijn reeds lang bestaande rivaal van de dino-thingy Inc. Nu zullen de omstandigheden van de ecotaks er toch wel toe leiden dat alle consumenten het CO₂-vrije eco-thingy kopen? Ha! Ten eerste kan een prijsverschil van 5% veel consumenten niet schelen. Imago is alles. Ten tweede zal Dino-thingy Inc, als het zich al bedreigd voelt door eco-thingy, zijn dino-thingy herintroduceren, benadrukken dat het veel patriottischer is, aankondigen dat het nu verkrijgbaar is in groen, en coole persoonlijkheden uitdossen in good ol' dino-thingy. "Echte mannen hebben dino-thingies nodig." Als dat niet helpt, zal Dino-Things Inc. persberichten uitgeven dat wetenschappers niet hebben kunnen uitsluiten dat langdurig gebruik van eco-thingies kanker veroorzaakt, en een grote zaak maken over het geval van een oude vrouw die werd neergehaald door een eco-thingie, of het vermoeden uitspreken dat eco-thingies een bedreiging vormen voor de kleine gevlekte fruitvleermuis. Angst, onzekerheid, twijfel. Als noodplan zou Dino-Things Inc. Eco-Things nog steeds volledig kunnen uitkopen. Het winnende product zal niets te maken hebben met energiebesparing wanneer de economische stimulans voor de consument slechts 5% bedraagt.

Het probleem van Harry en Mona

Stel je voor dat Harry de huiseigenaar een appartement verhuurt aan Mona de huurder. Harry is verantwoordelijk voor het onderhoud van het appartement en de apparaten erin, en Mona betaalt de maandelijkse rekeningen voor verwarming en elektriciteit. Hier is het probleem: Harry heeft geen reden om te investeren in veranderingen die Mona's rekeningen zouden verlagen. Hij zou efficiëntere gloeilampen kunnen installeren en een efficiëntere koelkast kunnen plaatsen; deze milieuvriendelijke toestellen zouden hun premie tijdens hun levensduur gemakkelijk terugbetalen, maar Mona zou er voordeel uit halen, niet Harry. Harry voelt ook weinig reden om de isolatie van het appartement te verbeteren of ramen met dubbele beglazing te plaatsen, vooral als hij bedenkt dat Mona's vriend Wayne het risico loopt een van de ramen te breken als hij dronken is. In principe zouden Harry en Mona de juiste beslissingen nemen in een perfecte marktomgeving: Harry zou alle energiebesparende maatregelen doorvoeren en Mona een iets hogere huur in rekening brengen; Mona zou beseffen dat het goedkoper is om in het nu moderne en goed ingerichte appartement te wonen en zou daarom graag de hogere huur betalen; Harry zou een hogere borgsom eisen voor het geval een van de nieuwe dure ramen breekt; en Mona zou rationeel reageren en Wayne eruit schoppen. Ik geloof echter niet helemaal dat Harry en Mona een perfecte marktomgeving zullen creëren. Mona is arm en heeft

moeite om grote deposito's te storten. Harry wil het appartement zo winstgevend mogelijk verhuren, en Mona wantrouwt zijn beloften van lage energierekeningen, en vermoedt dat Harry overdrijft.

Daarom moet er worden ingegrepen om Harry en Mona ertoe aan te zetten de juiste beslissing te nemen - de regering zou bijvoorbeeld een hoge belasting kunnen heffen op inefficiënte apparaten; de verkoop kunnen verbieden van koelkasten die niet aan bepaalde economische limieten voldoen; of een verplicht onafhankelijk beoordelingssysteem voor het appartement kunnen invoeren, zodat Mona de energieprijzen van het appartement kan nagaan voordat zij het huurcontract ondertekent.

[247] Investerings in onderzoek en ontwikkeling

Wij betreuen de minimale bedragen die de regering heeft uitgetrokken voor onderzoek en ontwikkeling op het gebied van hernieuwbare energie (12,2 miljoen pond in 2002-2003). . . . Als in het Verenigd Koninkrijk andere hulpbronnen dan wind moeten worden geëxploiteerd, moet dit veranderen. Wij konden niet om de conclusie heen dat de regering de energieproblemen niet serieus genoeg neemt.

Commissie wetenschap en technologie
van het Hogerhuis

Het ontbreken van wetenschappelijk inzicht leidt vaak tot oppervlakkige besluitvorming. Het witboek over energie uit 2003 was daar een goed voorbeeld van. Ik zou het niet graag publiekelijk amateuristisch noemen, maar het probleem werd er niet op een realistische manier mee aangepakt. Q38³⁸

Sir David King, voormalig Chief Scientist

Ik denk niet dat deze regering ooit serieus werk heeft gemaakt van hernieuwbare energiebronnen.

Jeremy Leggett, oprichter van Solarcentury

Ik denk dat de cijfers voor zichzelf spreken. Kijk maar eens naar **fig.28.5** (blz. 237) en vergelijk de miljarden die worden uitgegeven aan kantoorrenovatie en militair speelgoed met de honderd keer kleinere bijdrage aan onderzoek en ontwikkeling op het gebied van hernieuwbare energiebronnen. Het duurt tientallen jaren om her-

38) Q38 "Gebrek aan wetenschappelijk inzicht leidt vaak tot oppervlakkige beslissingen. Het energiedocument van 2003 was daar een goed voorbeeld van. Ik zou het niet graag publiekelijk amateuristisch noemen, maar het pakte het probleem niet op een realistische manier aan."

nieuwbare technologieën zoals getijdenenergie of zonne-energie te ontwikkelen. Kernfusie heeft ook decennia nodig. Al deze technologieën hebben dringend steun nodig om te kunnen slagen.

Individuele maatregelen

Soms vragen mensen me "Wat kan ik persoonlijk doen?" **Tabel.29.3** bevat acht eenvoudige persoonlijke acties die ik aanbeveel, en een zeer ruwe schatting van de potentiële besparingen die met elke actie gepaard gaan. De gebruikelijke voorbehouden zijn van toepassing, geen garanties. Uw besparingen zullen afhangen van uw vertrekpunt. De cijfers in **Tabel.29.3** gaan uit van de iets bovengemiddelde consument.



Eenvoudige maatregel	Mogelijke besparing
Trek een wollen trui aan en zet de thermostaat van de verwarming lager (op 15 of 17 °C of zo). Plaats individuele thermostaten op alle radiatoren. Zorg dat de verwarming uit staat als er niemand thuis is. Doe hetzelfde op je werk. [248]	20 kWh/d
Lees uw meters (voor gas, elektriciteit, water) elke week en zoek naar eenvoudige veranderingen die het verbruik verminderen (bv. apparaten uitschakelen). Doe vergelijkingswedstrijden met je vrienden. Lees ook de meters op uw werkplek af, zodat u uw energieverbruik voortdurend in de hand hebt.	4 kWh/d
Stop met vliegen met het vliegtuig.	35 kWh/d
Minder rijden, langzamer rijden, rustiger rijden, carpoolen, een elektrische auto, lid worden van een autoclub, fietsen, lopen, gebruik maken van bus en trein.	20 kWh/d
Blijf oude apparaten (bv. computers) gebruiken, vervang ze niet zo snel.	4 kWh/d
Verander de verlichting in energiezuinige lampen of LED's.	4 kWh/d
Koop geen rommel. Vermijd verpakking.	20 kWh/d
Eet zes dagen per week veganistisch.	10 kWh/d

Tabel.29.3: Acht eenvoudige persoonlijke acties

De bovenstaande maatregelen zijn gemakkelijk uit te voeren, maar de volgende in **Tabel.29.4** vergen wat meer planning, vastberadenheid en geld.

Eenvoudige maatregel	Mogelijke besparing
Elimineer tocht en koudebruggen.	5 kWh/d
Dubbele beglazing.	10 kWh/d
Verbeteren van muur-, dak- en vloerisolatie.	10 kWh/d
Zonne modules voor warm water.	8 kWh/d
Fotovoltaïsche modules.	5 kWh/d
Sloop oud gebouw en bouw nieuw.	35 kWh/d
Olie- of gasverwarming vervangen door grond- of luchtwarmtepompen.	10 kWh/d

Tabel.29.4: *Zeven moeilijkere maatregelen*

Ten slotte, **Tabel.29.5**, toont twee stijgers: eenvoudige maatregelen met kleine besparingen.

Maatregel	Mogelijke besparing
Kleding wassen in koud water.	0,5 kWh/d
Gebruik geen droger; gebruik in plaats daarvan een waslijn.	0,5 kWh/d

Tabel.29.5: *Enkele andere eenvoudige maatregelen met kleine besparingen.*

[249] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[241]	“een beetje onpraktisch eigenlijk” De volledige transcriptie van het interview met Tony Blair (9 januari 2007) is hier [2ykfgw]. Hier zijn nog enkele citaten: <u>Interviewer:</u> Hebt u er al eens aan gedacht om misschien niet naar Barbados te vliegen voor een vakantie en al die airmiles niet te gebruiken? <u>Tony Blair:</u> Ik zou er eerlijk gezegd tegenop zien om mijn vakanties in het buitenland op te geven. <u>Interviewer:</u> Het zou een duidelijk signaal zijn, als we niet die grote vliegreis naar de ... - een vakantie dichterbij huis? <u>Tony Blair:</u> Ja - maar persoonlijk denk ik dat deze dingen een beetje onpraktisch zijn om van mensen te verwachten dat ze dat doen. Ik denk dat wat we moeten doen is kijken naar hoe je vlieguren energie-efficiënter maakt, hoe je nieuwe brandstoffen ontwikkelt die ons in staat stellen om minder energie te verbranden en minder uit te stoten. Hoe - bijvoorbeeld - in de nieuwe frames voor de vliegtuigen, ze zijn veel energie-efficiënter zijn. Ik weet dat iedereen altijd - mensen denken waarschijnlijk dat de premier helemaal niet op vakantie moet gaan, maar ik denk dat als wat we op dit gebied mensen onrealistische doelen stellen, weet u, als we tegen mensen zeggen dat we alle goedkope vlieguren gaan schrappen... Ik wacht nog steeds op de eerste politicus die zich verkiesbaar stelt en dat gaat zeggen. en het zegt. En dat doen ze niet. Het andere citaat: "Tenzij we nu handelen, niet in de toekomst maar nu, zullen de gevolgen, hoe rampzalig ook, onomkeerbaar zijn. Er is dus niets ernstigers, dringender of veeleisender dan leiderschap." Tony Blair sprekend bij de lancering van de Stern review, 30 oktober 2006 [2nsvx2]. Zie ook [yxq5xk] voor verder commentaar.
[244]	Hervorming van de milieubelasting – 225 Hervorming van de milieubelasting. Zie de Green Fiscal Commission, www.greenfiscalcommission.org.uk.
[245]	The Economist roept op tot eco-belasting – 226 The Economist beveelt een koolstofbelasting aan. "Nuclear power's new age," The Economist, 8. September 2007.
[245]	De Conservatieve Partij's Kwaliteit van Leven Groep. –. De beleidsgroep Kwaliteit van het bestaan van de Conservatieve Partij - Gummer et al. (2007)

30 wereldaanpak

Energieplannen voor Europa, Amerika en de wereld

Fig.30.1. toont de energiebehoeften van veel landen en regio's, uitgezet tegen het Bruto Nationaal Product (BNP). Algemeen wordt aangenomen dat ontwikkeling en groei van de mensheid een goede zaak zou zijn, dus wanneer ik de wereldplannen voor duurzame energie schets, zal ik ervan uitgaan dat alle landen met een laag BNP per hoofd van de bevolking zich naar rechts in Fig.30.1 zullen ontwikkelen.

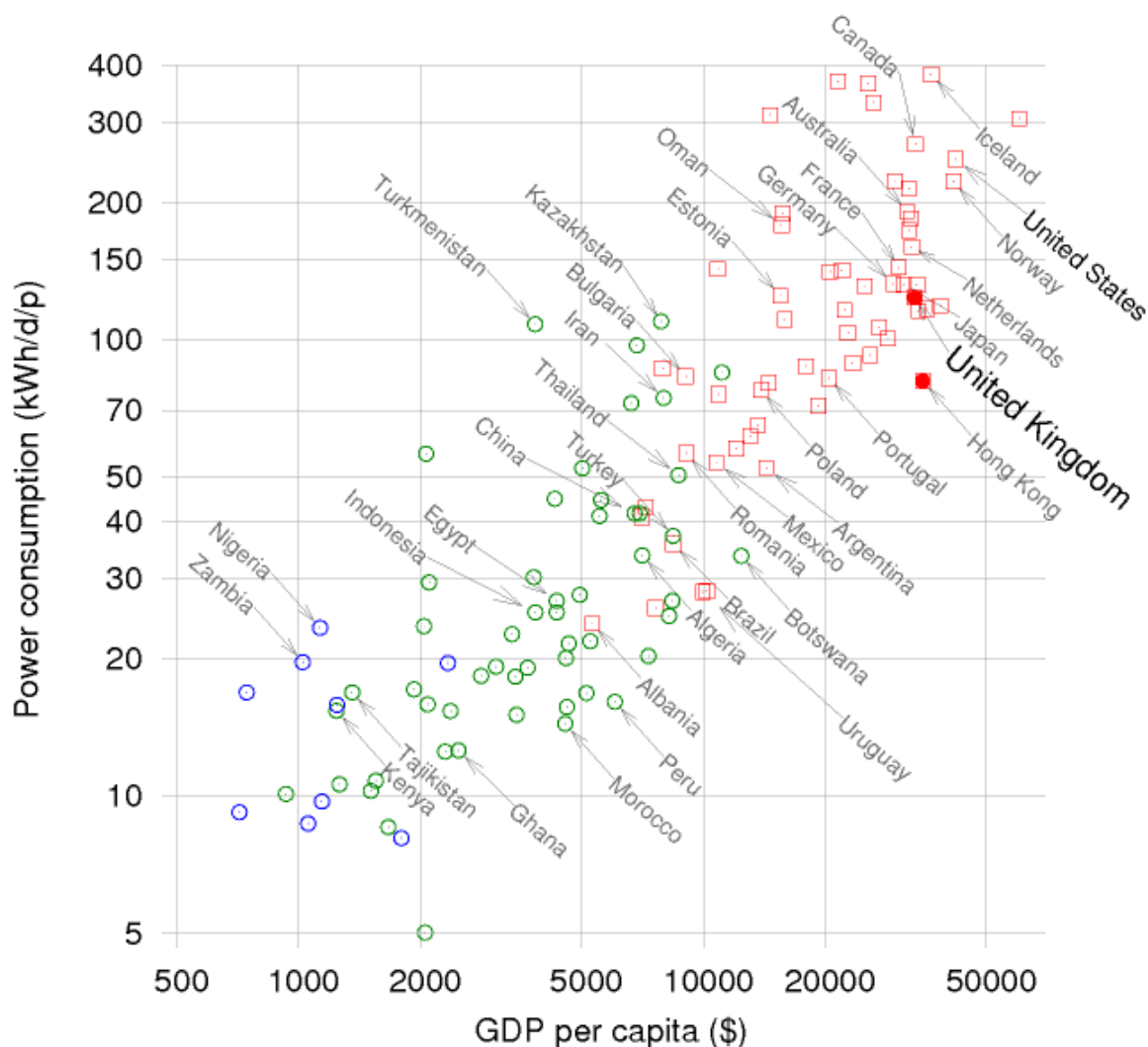


Fig.30.1: Energieverbruik per capita vs. BNP per capita, in koopkrachtequivalent US\$. Gegevens uit het UNDP Human Development Report, 2007. Vierkanten geven "hoogontwikkelde" landen aan, cirkels "lage" of "gemiddelde". Beide assen zijn in logaritmische schaal. Fig.18.4 toont dezelfde gegevens in lineaire schaal.

En naarmate hun BNP toeneemt, zullen deze landen onvermijdelijk meer energie gaan verbruiken. Het is niet duidelijk welk consumptiepatroon we hiervoor moeten plannen, maar ik denk dat het Europese gemiddelde (125 kWh per dag per persoon) een realistische veronderstelling is; als alternatief zouden we kunnen aannemen dat door efficiëntieverhogende maatregelen, zoals we in de hoofdstukken 19-28 voor het vereenvoudigde Engeland hebben laten zien, alle landen een Europese levensstandaard met een lager energieverbruik kunnen bereiken. In het verbruiksplan op blz. [224] is het verbruik in vereenvoudigd Engeland gedaald tot ongeveer 68 kWh/d/p. Aangezien er in het Vereenvoudigde Engeland weinig industriële activiteit was, zou het passend kunnen zijn uit te gaan van een iets hogere doelstelling, misschien 80 kWh/d/p zoals in Hong Kong.

[251] Herhaling van de berekeningen voor Europa

Kan Europa leven van zijn hernieuwbare energiebronnen

De bevolkingsdichtheid in Europa is ongeveer de helft van die in Engeland, zodat er meer land beschikbaar is om grote installaties voor hernieuwbare energie te plaatsen. Het landoppervlak van de EU bedraagt ongeveer 9000 m² per persoon. Veel hernieuwbare energiebronnen in Europa hebben echter een lagere energiedichtheid (per oppervlakte) dan in Engeland: in het grootste deel van Europa is er minder wind, minder golven en minder getijden. Maar sommige delen hebben meer waterkracht (in Scandinavië en Centraal-Europa); en sommige hebben meer zonne-energie. Laten we de ruwe cijfers bepalen.

Wind

Het hart van continentaal Europa heeft lagere typische windsnelheden dan de Britse eilanden - een groot deel van Italië bijvoorbeeld heeft windsnelheden van minder dan 4 m/s. Laten we aannemen dat een vijfde van Europa voldoende hoge windsnelheden heeft voor economische windmolenparken, met een vermogensdichtheid van 2 W/m², en laten we verder aannemen dat we deze regio's behandelen zoals Engeland in hoofdstuk 4 en ze voor 10% vullen met windmolenparken. De totale oppervlakte van de EU bedraagt ongeveer 9000 m² per persoon, dus wind zorgt voor

$$1/5 \times 10\% \times 9000 \text{ m}^2 \times 2 \text{ W/m}^2 = 360 \text{ W},$$

wat neerkomt op 9 kWh/d per persoon.

Waterkracht

De huidige waterkrachtproductie bedraagt in totaal 590 TWh/j of 67 GW. Verdeeld over 500 miljoen mensen is dit 3,2 kWh/d/p. De productie vindt hoofdzakelijk plaats in Noorwegen, Frankrijk, Zweden, Italië, Oostenrijk en Zwitserland. Als elk land zijn waterkrachtcapaciteit zou verdubbelen - wat waarschijnlijk niet gemakkelijk zou zijn - zou waterkracht 6,4 kWh/d per persoon opleveren.

Golven

Als we de hele Atlantische kust nemen (ongeveer 4000 km) en dat vermenigvuldigen met een gemiddeld productietempo van 10 kW/m, krijgen we **2 kWh/d per persoon**. De Oostzee en de Middellandse Zee hebben geen noemenswaardige bronnen van golfslag.

Getij

Als we uitgaan van het dubbele van het voor Engeland geraamde getijdenpotentieel, moeten we rekening houden met de Franse, Ierse en Noorse getijdenenergiebronnen. Verdeeld over 500 miljoen mensen, krijgen we **2,6 kWh/d per persoon**. De Oostzee en de Middellandse Zee hebben geen noemenswaardige getijdenvoorraden.

Fotovoltaïsche en thermische zonne-energie op daken

De meeste plaatsen in Europa zijn zonniger dan Engeland, dus PV-panelen op het continent leveren meer stroom. 10 m² genereren ongeveer 7 kWh/d in alle plaatsen ten zuiden van Engeland. Evenzo kunnen warmwatermodules een gemiddelde van 3,6 kWh/d aan laagwaardige thermische energie leveren. [252] (ik zie geen reden om meer dan 2 m² zonneboiler per persoon te plaatsen, omdat deze capaciteit al voldoende is om in de typische behoefte aan warm water te voorzien). ^{Q3939}

Wat nog meer?

Het totaal tot nu toe is $9 + 6,4 + 2 + 2,6 + 7 + 3,6 = 30,6$ kWh/d per persoon. De enige bronnen die tot dusver buiten beschouwing zijn gelaten, zijn geothermische energie en grootschalige zonneparken (met spiegels, modules of biomassa).

Geothermische energie zou kunnen werken, maar bevindt zich nog in de onderzoeksfase. Ik denk dat het moet worden behandeld als fusie: een goede investering, maar nog niet betrouwbaar.

Maar hoe zit het met zonneparken? We zouden ons 5% van Europa (450 m² per persoon) aan PV-systemen in de grond kunnen voorstellen, zoiets als die in Beieren uit **Fig.6.7** (met een vermogensdichtheid van 5 W/m²). Dit zou resulteren in een gemiddeld vermogen van

$$5 \text{ W/m}^2 \times 450 \text{ m}^2 = \mathbf{54 \text{ kWh/d per persoon}}$$

inbrengen. PV zou dus een aanzienlijke bijdrage leveren. Het grootste probleem met PV-modules is echter hun kostprijs. De energieproductie in de winter is ook een punt van zorg.

39) ^{Q39} *Ondersteuning van verwarming met zonne-energie door middel van extra warmwatermodules kan echter zinvol zijn voor veel gebieden die verder gaan dan deze aanpak.*

Energie uit planten? Planten vangen slechts $0,5 \text{ W/m}^2$ (**Fig.6.11**). Ervan uitgaande dat Europa zichzelf moet voeden, kan de energiebijdrage van Europese planten buiten hun gebruik als voedsel niet enorm zijn. Ja, er zullen hier en daar koolzaadolievelden en bosbouw zijn, maar ik kan me niet voorstellen dat de niet voor voeding bestemde delen van de fabrieken goed zullen zijn voor meer dan **12 kWh/d per persoon**.

De basisbelasting

Laten we realistisch zijn: Net als Engeland kan Europa niet leven van zijn eigen hernieuwbare energiebronnen. Dus als het doel is geleidelijk een einde te maken aan fossiele brandstoffen, heeft Europa kernenergie nodig of zonneparken in andermans woestijn (zoals in **Fig.25.5** op blz. [199]), of beide.



Afb.30.2: Een module voor warm water op zonne-energie levert warm water voor een gezin in Michigan. De pomp van het systeem wordt aangedreven door de kleine PV-module aan de linkerkant.

Herhaling van de berekeningen voor Noord-Amerika

De gemiddelde Amerikaan verbruikt 250 kWh per dag. Kunnen we dit doel bereiken met hernieuwbare energiebronnen? Wat als we schokkende efficiëntiemaatregelen zouden invoeren (zoals zuinige auto's of hogesnelheidstreinen), zodat Amerikanen in de ellende van een Europese of Japanse levensstandaard van slechts 125 kWh/d zouden worden gestort?

Wind

In een studie van Elliott et al. (1991) is het windenergiepotentieel van de Verenigde Staten in kaart gebracht. De gebieden met de meeste wind zijn North Dakota, Wyoming, en Montana. Zij berekenden dat in de gehele staten 435.000 km^2 windgebied zou kunnen worden geëxploiteerd zonder **[253]** al te veel mensen voor het hoofd te stoten, en dat de daar opgewekte elektriciteit 4.600 TWh per jaar zou bedragen, ongeveer **42 kWh/d/p** gelijkelijk verdeeld over 300 miljoen Amerikanen. De berekeningen gingen uit van een gemiddelde energiedichtheid van $1,2 \text{ W/m}^2$ - minder dan de 2 W/m^2 waarop we ons in hoofdstuk 4 hebben gebaseerd. De oppervlakte van deze windparken, 435.000 km^2 , is ruwweg de oppervlakte van Californië. De vereiste windmolenparken (uitgaande van een belastingsfactor van 20%) zouden een capaciteit hebben van 2.600 GW, een 200-voudige toename ten opzichte van de inventaris in de VS.

Off-shore

Wind op de kust Als we de ondiepe kustwateren met een oppervlakte ongeveer gelijk aan de som van Delaware en Connecticut (20.000 km^2 , een aanzienlijk deel van

de totale ondiepe kustwateren van de Amerikaanse oostkust) vullen met windmolens die een vermogensdichtheid van 3 W/m^2 halen, krijgen we een gemiddeld vermogen van 60 GW. Dat is $4,8 \text{ kWh/d/p}$ verdeeld over 300 miljoen mensen. De vereiste turbines zouden 15 keer zo groot zijn als de momenteel in de VS bestaande turbines.

Geothermisch

In hoofdstuk 16 heb ik de geothermische studie van het MIT (Massachusetts Institute of Technology, 2006) genoemd. De auteurs zijn overtuigd van het geothermisch potentieel van Noord-Amerika, vooral in de westelijke staten waar zich hete rots bevindt. "Met een redelijke investering in O&O zouden warmedroge-rotsprocessen (HDR, ook wel enhanced geothermal system, EGS genoemd) in de komende 50 jaar een generatorcapaciteit van 100 GW(el) of meer moeten opleveren die tegen concurrerende kosten kan werken. Bovendien bieden HDR-processen een betrouwbare bron van energie op zeer lange termijn." Laten we aannemen dat ze gelijk hebben. 100 GW aan elektriciteit is 8 kWh/d/p voor 300 miljoen mensen.

Waterkracht

Waterkrachtcentrales in Canada, de VS en Mexico genereren ongeveer 660 TWh per jaar. Verspreid over 500 miljoen mensen, is dat $3,6 \text{ kWh/d/p}$. Kan de hydro-elektrische energie in Noord-Amerika verdubbeld worden? Dat zou $7,2 \text{ kWh/d/p}$ zijn.

Wat nog meer?

Tot nu toe hebben we $42 + 4,8 + 8 + 7,2 = 62 \text{ kWh/d/p}$. Niet eens genoeg voor een Europees bestaansminimum! Ik zou verschillende andere opties kunnen noemen, zoals het duurzaam verbranden van Canadese bossen in warmtekrachtkoppelingscentrales. Maar in plaats van het lijden te verlengen, laten we ons richten op de dikke bult: CSP – zonne-energiecentrales.

Fig.30.3 toont het gebied in Noord-Amerika dat iedereen daar (500 miljoen mensen) voorziet van een gemiddeld vermogen van 250 kWh/d .

De basisbelasting

Noord-Amerikaanse hernieuwbare energiebronnen zonder zonne-energie zijn niet genoeg om te overleven. Dus Noord-Amerika heeft zonne-energiecentrales nodig in de woestijn, of kernenergie, of allebei.

[254] Herhaling van de berekeningen voor de hele wereld

Hoe kunnen 6 miljard mensen worden voorzien van energie die overeenkomt met de Europese levensstandaard, zeg 80 kWh/d/p ?

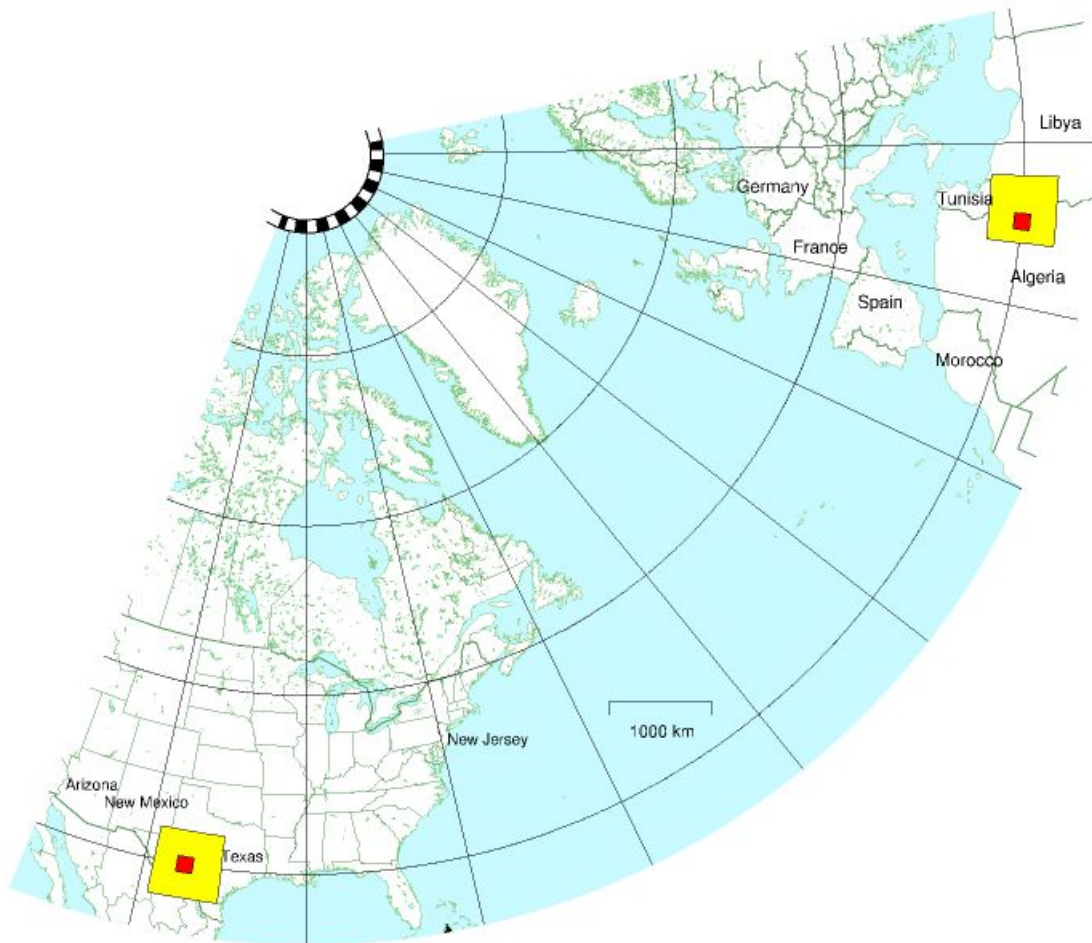


Fig.30.3: Het pleintje slaat weer toe. Het vierkant van 600 km x 600 km in Noord-Amerika, volledig gevuld met CSP, zou genoeg elektriciteit leveren om 500 miljoen mensen van stroom te voorzien bij een gemiddeld Amerikaans verbruik van 250 kWh/d. De kaart omvat ook het eerder genoemde vierkant van 600 km bij 600 km in Afrika. Ik ben uitgegaan van een vermogensdichtheid van 15 W/m², zoals ik daar deed. De oppervlakte van een geel vierkant is iets groter dan Arizona, en 16 keer groter dan New Jersey. Binnen elk groter vierkant bevindt zich een kleiner vierkant van 145 km x 145 km, wat overeenkomt met het gebied - ooit New Jersey - dat nodig is om 30 miljoen mensen te voorzien van 250 kWh per dag per persoon.

Wind

De belangrijkste punten in de wereld met sterke aanhoudende winden zijn de centrale staten van de VS (Kansas, Oklahoma); Saskatchewan in Canada; de zuidelijke uiteinden van Argentinië en Chili; Noordoost-Australië; Noordoost- en Noordwest-China; Noordwest-Soedan; het zuidwesten van Zuid-Afrika; Somalië, Iran en Afghanistan. En overal voor de kust, behalve in een strook van 60 graden rond de evenaar.

[255] Voor onze mondiale schattingen gaan wij uit van de cijfers van Greenpeace en de European Wind Energy Association: "de totale beschikbare windreserves

worden wereldwijd geschat op 53.000 TWh per jaar", of **24 kWh/d per persoon**.

Waterkracht

Wereldwijd bedraagt de waterkracht momenteel 1,4 kWh/d per persoon. Volgens de website www-ieahydro.org "schatten de International Hydropower Association en het Internationaal Energieagentschap het technisch ontwikkelbare waterkrachtpotentieel wereldwijd op 14.000 TWh per jaar [6,4 kWh/d/p wereldwijd], waarvan 8.000 TWh/j [**3,6 kWh/d/p**] momenteel ook als economisch ontwikkelbaar wordt beschouwd. Afrika, Azië en Latijns-Amerika bieden het meeste ontwikkelingspotentieel."

Getijdenenergie

Er zijn enkele plaatsen in de wereld met een vergelijkbaar getijdenpotentieel als het Severn estuarium (**Fig.14.8**). Argentinië heeft twee locaties, San José en Golfo Nuevo; Australië heeft Walcott Inlet; de VS en Canada delen de Baai van Fundy; Canada heeft Cobequid, India heeft de Golf van Khambat, de VS heeft Turnagain Arm en Knik Arm en Rusland heeft Tugur. En dan is er de wereldwinnaar, een plaats genaamd Penzhinsk in Rusland met een potentieel van 22 GW - tien keer groter dan de Severn! Kowalik (2004) schat dat wereldwijd 40-80 GW aan getijdenenergie kan worden opgewekt. Met 6 miljard mensen is dat **0,16-0,32 kWh/d per persoon**.

Golven

Het maximale vermogen dat door golven kan worden opgewekt, kan worden geschat door de lengte van de bruikbare kustlijn (ongeveer 300.000 km) te vermenigvuldigen met het typische vermogen per lengte-eenheid van de kustlijn (10 kW per meter): dit levert een ruw vermogen van 3000 GW op. Als we aannemen dat 10% van dit vermogen wordt geabsorbeerd door energiesystemen en omgezet in elektriciteit met een efficiëntie van 50%, dan leveren golfenergiecentrales **0,5 kWh/d per persoon**.

Geothermisch

Volgens D. H. Freeston van het Auckland Geothermal Institute, is er in 1995 wereldwijd een geothermisch vermogen van 4GW - dat is 0,01 kWh/d per persoon. Ervan uitgaande dat de MIT auteurs van pagina [253] gelijk hebben en dat de wereld vergelijkbaar is met Amerika, opent geothermische energie ons naar **8 kWh/d per persoon**.

Zon voor energiegewassen

De mensen zijn allemaal enthousiast over energiegewassen zoals jatropha, die naar verluidt niet hoeven te concurreren met voedselgewassen om grond omdat ze ook op woestijngrond groeien.

Mensen moeten naar de cijfers kijken voordat ze opgewonden raken. De cijfers voor Jatropa ha staan op blz. [304], en zelfs als heel Afrika volledig bedekt zou zijn met Jatropa-plantages, zou de geproduceerde stroom slechts **8 kWh/d/p** voor 6 miljard mensen opleveren (dat is slechts een derde van het huidige oliegebruik). Ze kunnen zeker niet van hun olie-afhankelijkheid afkomen met jatropa! Laten we een bovengrens schatten voor de hoeveelheid energie die energiegewassen voor de hele wereld kunnen leveren, volgens dezelfde methode als voor Engeland in [256] **hoofdstuk 6**: Stel dat we alle akkerland zouden nemen en het zouden bestemmen voor energiegewassen. 18% van het landoppervlak is momenteel akkerland en cultuurgrond - een oppervlakte van 27 miljoen km². Dat is **4.500 m² per persoon**, verdeeld over 6 miljard mensen. Als we uitgaan van een vermogensdichtheid van 0,5 W/m² en van verliezen van 33% bij verwerking en teelt, komt het resultaat voor energiegewassen, als ze de hele landbouwgrond in beslag nemen, uit op **36 kWh/d per persoon**. Nu is dit misschien een onderschatting omdat we in **Fig.6.11** (blz. [048]) hebben gezien dat Braziliaans suikerriet een vermogensdichtheid van 1,6 W/m² kan leveren, ongeveer drie keer zoveel als de bovenstaande veronderstelling. Oké, misschien hebben Braziliaanse energiegewassen een soort van toekomst. Maar ik ga liever naar de volgende optie.

Tabel.30.4: Wereldwijde zonneshijncijfers

Sheffield	28%
Edinburgh	30%
Manchester	31%
Kurk	32%
Londen	34%
Keulen	35%
Kopenhagen	38%
München	38%
Parijs	39%
Berlijn	42%
Wellington, NZ	43%
Seattle	46%
Toronto	46%
Detroit, MI	54%
Winnipeg	55%
Peking 2403	55%
Sydney 2446	56%
Pula, Kroatië	57%
Nice, Frankrijk	58%
Boston, MA	58%
Bangkok, Thailand	60%
Chicago	60%
New York,; MA	61 %
Lissabon, Portugal	61%
Kingston, Jamaica	62%
San Antonio	62%
Sevilla, Spanje;	66%
Nairobi, Kenia	68%
Johannesburg, SA	71%
Tel Aviv	74%
Los Angeles	77%
Uppington, SA	91%
Yuma, AZ	93%
Sahara	98%

Zonneverwarming, fotovoltäische energie, CSP zonne-energiecentrales

Als het om thermische zonneboilers gaat, hoeft u geen twee keer na te denken. Het werkt bijna overal ter wereld. China is de wereldleider in deze technologie. Wereldwijd is er meer dan 100 GW aan capaciteit voor thermische zonne-energiecentrales, waarvan meer dan de helft in China.

PV-centrales zouden technisch haalbaar zijn in Europa, maar ik dacht dat ze te duur waren. Ik hoop dat ik het mis heb, natuurlijk. Het zou prachtig zijn als de kosten van PV-modules zouden dalen zoals de kosten van computers de afgelopen 40 jaar zijn gedaald.

Mijn inschatting is dat in veel regio's de beste zonnetechnologie voor elektriciteitsopwekking de CSP-zonnecentrales zullen zijn die we op blz. 198 en 254 hebben besproken (Fig.30.3). Op die bladzijden hadden wij reeds het idee geopperd dat een miljard mensen in Europa en Noord-Afrika van energie zouden kunnen worden voorzien door zonne-energiecentrales van landformaat in de woestijnen rond de Middellandse Zee, en dat een half miljard Noord-Amerikanen van energie zouden kunnen worden voorzien door energiecentrales van vergelijkbare omvang in de woestijnen van de VS en Mexico. Ik laat het aan de lezer over om geschikte woestijnen te vinden om de resterende 4,5 miljard mensen te bevoorraden.

De basisbelasting

Niet-zonne hernieuwbare energiebronnen tellen als volgt op: Wind 24 kWh/d/p, waterkracht 3,6 kWh/d/p, getij 0,3 kWh/d/p, golf 0,5 kWh/d/p, geothermisch 8 kWh/d/p - in totaal 36 kWh/d/p. Ons doel was een verbruik aan het eind van het seizoen van 80 kWh/d/p. Het resultaat is duidelijk: niet-zonne-energie is weliswaar "groot", maar niet groot genoeg. Om een plan te maken dat werkt, moeten we een of meer vormen van zonne-energie toevoegen. Of kernenergie. Of allebei.

[257] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[253]	Noord-Amerika off-shore wind - 234 Noord-Amerikaanse offshore windbronnen. www-ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-wn-dp.html
[253]	Noord-Amerika heeft dus zonne-energiecentrales nodig in zijn woestijnen, kern-energie, of beide. – 235 Noord-Amerika heeft zonne-energie nodig in zijn eigen woestijnen, of kernenergie, of allebei. – Voor Google's plan uit 2008 om het gebruik van fossiele brandstoffen in de VS met 40% te verminderen, zie Jeffery Greenblatt's artikel Clean Energy 2030 [3lcw9c]. De belangrijkste punten van dit plan zijn efficiëntiemaatregelen, elektrificatie van het vervoer en duurzame elektriciteitsproductie. Het plan voor de elektriciteitsproductie omvat 10,6 kWh/d/p aan windenergie, 2,7 kWh/d/p aan fotonvoltaïsche zonne-energie, 1,9 kWh/d/p aan geconcentreerde zonne-energie (CSP), 1,7 kWh/d/p aan biomassa, en 5,8 kWh/d/p aan geothermische energie tegen 2030, voor een totale toename van hernieuwbare energie van 23 kWh/d/p. Zij gaan ook uit van een kleine toename van kernenergie, van 7,2 kWh/d/p tot 8,3 kWh/d/p, en geen verandering in waterkracht. Aardgas zou verder worden gebruikt, met een bijdrage van 4 kWh/d/p.
[255]	Wereldwijd bedraagt de waterkracht momenteel 1,4 kWh/d per persoon - 237 Het totale waterkrachtpotentieel van de wereld... Quelle: www-ieahydro.org/faq.htm .
[258]	resulteert dit in een ruw vermogen van 3000 GW - - Het mondiale golfvermogen aan de kust wordt geraamd op 3000 GW. Zie Quayle en Changery (1981).
[259]	Geothermische capaciteit van 4GW wereldwijd in 1995 - Geothermische energie in 1995. Freeston (1996).
[255]	Energiegewassen – 238 Energiegewassen. Zie Rogner (2000) voor schattingen die vergelijkbaar zijn met de mijne.
	Literatuur: Het tijdschrift Nature publiceerde een artikel van acht pagina's over hoe de wereld van energie kan worden voorzien (Schiermeier et al., 2008).

31 slotopmerking

Het laatste waar we over moeten praten

Kooldioxide uit de lucht opvangen is wel het laatste waar we het over moeten hebben.

Als ik dat zeg, is dat opzettelijk dubbelzinnig. Ten eerste is de energie die nodig is om CO₂ uit de lucht te halen zo enorm dat het bijna absurd lijkt om erover te praten (en de vrees bestaat dat het opblazen van de mogelijkheid om de klimaatverandering te genezen door middel van dit soort geo-engineering de huidige inactiviteit verder zal ondersteunen). Ten tweede denk ik echter dat we erover moeten praten, dat we moeten nadenken over hoe we het het beste kunnen doen, en dat we de basis moeten leggen voor onderzoek waaruit blijkt hoe het nog beter kan. Want het opvangen van kooldioxide uit de lucht zou wel eens onze laatste verdedigingslinie kunnen blijken te zijn als de klimaatverandering echt zo erg is als klimaatwetenschappers beweren, en als de mensheid er niet in slaagt gebruik te maken van de eenvoudiger en subtieler opties die vandaag nog beschikbaar zijn.



Voordat we ons kunnen buigen over het afvangen van CO₂ uit de lucht, moeten we een genuanceerder beeld hebben van de mondiale koolstofcyclus.

Inzicht in CO₂

Toen ik dit boek aanvankelijk plande, was het helemaal niet mijn bedoeling om het over klimaatverandering te hebben. In sommige kringen was "Bestaat de klimaatverandering?" een controversiële vraag. Dus was "Wordt het veroorzaakt door mensen?" of "Maakt het uit?" En, aan het eind van de controverse, "Hoe moeten we er mee omgaan?" Ik vond dat duurzame energieproductie een boeiend onderwerp op zich was, en dat het het beste zou zijn om deze controverses te vermijden. Mijn argument was altijd: "Het maakt niet uit wanneer de fossiele brandstoffen opraken, het maakt niet uit of klimaatver-



16 12 16

Fig.31.1: De gewichten van koolstof en CO₂ zijn in de verhouding 12 tot 44, omdat het koolstofatoom 12 atomaire eenheden en de zuurstofatomen elk 16 atomaire eenheden elk. $12 + 16 + 16 = 44$.

andering bestaat of niet, het is absoluut niet duurzaam om fossiele brandstoffen te verbranden; we moeten ons voorstellen duurzaam te leven en uitzoeken hoeveel duurzame energieproductie mogelijk is."

Maar de klimaatverandering is doorgedrongen tot het publieke bewustzijn, waar zij allerlei interessante schattingsvragen oproept. Daarom heb ik besloten het een beetje te bespreken in het voorwoord en hier in het slothoofdstuk. Geen uitgebreide discussie, alleen wat interessante cijfers.

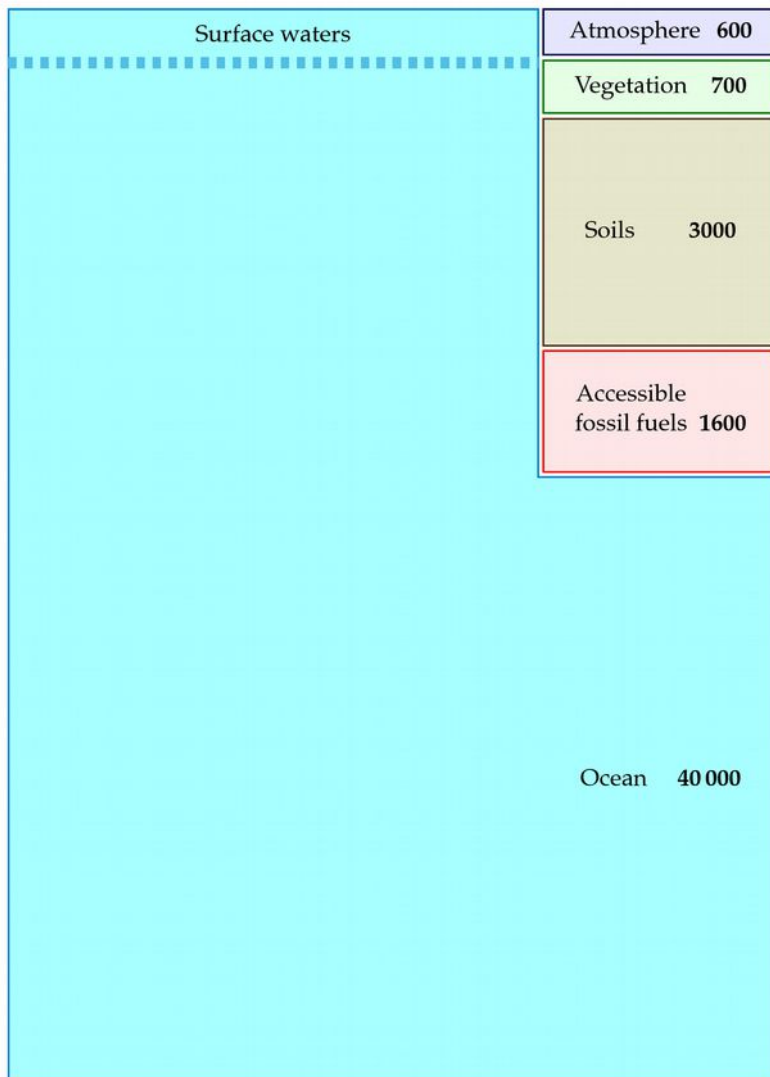
Eenheden

De kosten van CO₂-verontreiniging worden gewoonlijk gemeten in dollars of euro's per ton CO₂, dus ik gebruik ton CO₂ als de belangrijkste eenheid wanneer ik het over CO₂-verontreiniging heb, en ton CO₂ per jaar wanneer ik het over verontreinigingstarieven heb. (De broeikasgasemissies van de gemiddelde Europeaan komen overeen met 11 ton CO₂ per jaar, of 30 kg CO₂ per dag). Maar als we het hebben over koolstof in fossiele brandstoffen, planten, bodem of water, geef ik het in tonnen koolstof aan. [259] Een ton CO₂ bevat 12/44 ton koolstof, iets meer dan een kwart ton. Op wereldschaal zal ik het hebben over gigatonnen koolstof (Gt C). Een gigaton koolstof is een miljard ton. Gigatons zijn moeilijk voor te stellen, maar je kunt ze op een menselijke schaal zetten: Stel je een ton steenkool voor (ongeveer wat je nodig hebt om je huis een jaar lang te verwarmen). Stel je nu voor dat iedereen elk jaar zijn ton kolen verbrandt: Dat is 6 Gt C per jaar, omdat onze planeet 6 miljard mensen herbergt.

Waar is de koolstof

Waar is al die koolstof? We moeten weten hoeveel zich in de oceanen, de bodem en de vegetatie bevindt in vergelijking met de koolstof in de atmosfeer, als we de gevolgen van de CO₂-uitstoot willen begrijpen.

Fig.31.2 laat zien waar de koolstof zit. Het grootste deel - 40.000 GT - bevindt zich in de oceaan (in de vorm van opgelost CO₂-gas, carbonaten, in levende planten en dieren, en in rottend materiaal). Bodem en vegetatie bevatten samen ongeveer 3.700 Gt. De ontleedbare fossiele brandstoffen - hoofdzakelijk steenkool - bevatten ongeveer 1.600 Gt. En de atmosfeer bevat 600 Gt koolstof.



Tot voor kort waren al deze koolstofreservoirs groten-deels in evenwicht: alle stromen uit een reservoir (d.w.z. bodem, vegetatie of atmosfeer) werden gecompenseerd door stromen van gelijke omvang naar het reservoir. [260] De stromen naar en uit de opslagplaats voor "fossiele brandstoffen" waren beide te verwaarlozen. Toen begonnen mensen fossiele brandstoffen te verbranden, waardoor twee extra stromen ontstonden die niet in evenwicht waren, zoals **Fig.31.3** laat zien.

Fig.31.2: *Geraamde hoeveelheden koolstof, in gigatons, op toegankelijke plaatsen op aarde. (Er zit nog veel meer koolstof in gesteente. Deze koolstof circuleert op tijdschalen van miljoenen jaren, in een langdurig evenwicht tussen koolstof in sedimenten die naar beneden worden gedrukt bij tektonische plaatgrenzen, en koolstof die van tijd tot tijd weer naar buiten komt door vulkaanuitbarstingen. Om het eenvoudig te houden, laat ik deze geologische koolstof buiten beschouwing).*

neden worden gedrukt bij tektonische plaatgrenzen, en koolstof die van tijd tot tijd weer naar buiten komt door vulkaanuitbarstingen. Om het eenvoudig te houden, laat ik deze geologische koolstof buiten beschouwing).

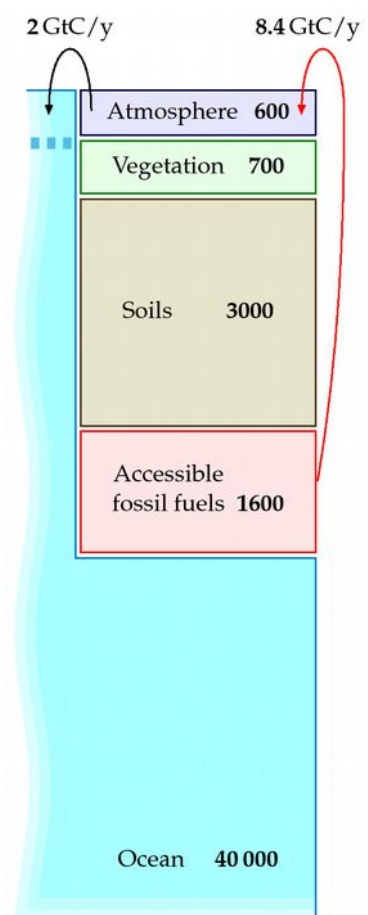
De verbranding van fossiele brandstoffen bedroeg ongeveer 1 Gt C/j in 1920, 2 Gt C/j in 1955, en 8,4 Gt C in 2006. (Deze cijfers omvatten kleinere bijdragen van de cementproductie, waarbij CO₂ vrijkomt uit kalksteen).

Hoe heeft deze extra stroom het beeld van **Fig.31.2** gewijzigd? Nou, dat is niet precies bekend. **Fig.31.3** toont de belangrijkste dingen die bekend zijn. Een groot deel van de extra 8,4 Gt C per jaar die wij in de atmosfeer brengen, blijft in de atmosfeer en verhoogt de kooldioxideconcentratie. De atmosfeer re-equilibreert relatief snel met het oceaانwater nabij het oppervlak (deze relaxatie duurt slechts ongeveer 5 tot 10 jaar), wat resulteert in een netto flux van CO₂ van de atmosfeer naar de oceanen van ongeveer 2 Gt C per jaar. (Recent onderzoek wijst er echter op dat deze koolstofopname in de oceaan wellicht afneemt). Deze onevenwichtige stroming naar het

oppervlaktewater verhoogt de zuurgraad van de oceaan, wat slecht nieuws is voor koralen. Er stroomt nog wat extra CO₂ de bodem en de vegetatie in, misschien 1,5 Gt C per jaar, maar deze fluxen zijn niet betrouwbaar gemeten. Omdat ongeveer de helft van de koolstofemissie in de atmosfeer blijft, zal een voortzetting van de verontreiniging met 8,4 Gt C per jaar het CO₂-gehalte in de atmosfeer en in het oppervlaktewater blijven doen toenemen

Wat is het doel op lange termijn van deze extra CO₂? Welnu, aangezien de totale hoeveelheid in fossiele brandstoffen zo veel kleiner is dan die in de oceanen, zal "op den duur" de extra koolstof in de oceanen terechtkomen en zal de hoeveelheid koolstof in de atmosfeer, de vegetatie en de bodem weer normaal worden. Maar "op lange termijn" betekent hier duizenden jaren. Het evenwicht tussen de atmosfeer en het oppervlaktewater is snel, zoals ik al zei, maar **Fig.31.2 en 31.3** tonen een stippellijn van scheiding tussen het oppervlaktewater en de rest van de oceaan. Op een tijdschaal van 50 jaar is deze grens een virtueel massieve muur. Radioactieve koolstof die door de kernproeven van de jaren '60 en '70 over de hele wereld is verspreid, is slechts tot 400 m diepte in de oceanen doorgedrongen. De gemiddelde diepte van de oceaan bedraagt daarentegen 4000 m.

Fig.31.3: De pijlen tonen twee extra koolstofstromen die ontstaan bij de verbranding van fossiele brandstoffen. Er is een gebrek aan evenwicht tussen de 8,4 Gt C/j die door verbranding van fossiele brandstoffen in de atmosfeer terechtkomt en de 2 Gt C/j die door de oceanen wordt geabsorbeerd. In deze schets wordt geen rekening gehouden met de slecht gemeten fluxen tussen atmosfeer, bodem, vegetatie, enz.



De oceanen circuleren langzaam: een slok diep oceaanwater doet er ongeveer 1000 jaar over om naar de oppervlakte te rollen en weer naar beneden. [261] De circulatie van diep water wordt aangedreven door een combinatie van temperatuur- en zoutgradiënten, en wordt daarom thermohaliene circulatie genoemd (in tegenstelling tot de circulatie van oppervlaktewater, die door de wind wordt aangedreven).

Deze langzame vermenging van de oceanen heeft een nefaste consequentie: wij hebben genoeg fossiele brandstoffen om ons klimaat voor de komende 1000 jaar te beïnvloeden.

Waar gaat de koolstof heen

Fig.31.3 is een grove vereenvoudiging. De mens veroorzaakt nog andere stromen die niet in het diagram zijn aangegeven: Bij de verbranding van turf en bossen op Borneo in 1997 alleen al kwam 0,7 Gt C vrij. Bij toevallige branden in kolenlagen komt ongeveer 0,25 Gt C per jaar vrij.

Niettemin helpt deze vereenvoudiging ons om ruwweg te begrijpen wat er op korte en middel-lange termijn in verschillende scenario's zal gebeuren: Als de vervuiling doorgaat zoals zij is en u de komende 50 jaar 500 Gt koolstof blijft verbranden, kunnen we verwachten dat er jaarlijks 2 Gt C CO₂ in het oppervlaktewater zal sijpelen. Tegen 2055 zal minstens 100 Gt van die 500 Gt in het oppervlaktewater terecht zijn gekomen en zal de atmosferische CO₂-concentratie ongeveer het dubbele bedragen van het pre-industriële niveau.

Als de verbranding van fossiele brandstoffen tegen 2050 tot nul zou worden gereduceerd, zou ook de flux van 2Gt van de atmosfeer naar de oceanen aanzienlijk worden verminderd. (Ik dacht aanvankelijk dat deze flux tientallen jaren zou aanhouden, maar dat zou alleen het geval zijn als de atmosfeer en het oppervlaktewater uit balans zouden zijn; maar zoals gezegd, ontspannen de atmosfeer en het oppervlaktewater zich binnen een paar jaar). Een groot deel van de 500 Gt C die wij in de atmosfeer hebben gebracht, zal de komende paar duizend jaar slechts geleidelijk in de oceanen terechtkomen naarmate het oppervlaktewater naar beneden circuleert en wordt vervangen door nieuw water uit de diepte.

Op die manier kan onze verstoring van de koolstofconcentratie worden gecorrigeerd, maar pas na duizenden jaren. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de langdurige verstoring van de atmosfeer het ecosysteem niet ingrijpend verandert. Zo is het bijvoorbeeld denkbaar dat de toename van de zuurtegraad van het oppervlaktewater een zodanige vermindering van de oceaانflora veroorzaakt dat een nieuwe vicieuze cirkel op gang komt: Een hogere zuurgraad betekent een lagere plantengroei, wat betekent dat minder planten CO₂ uit de oceaan opnemen, waardoor de zuurgraad van de oceaan nog verder toeneemt. Dergelijke vicieuze cycli (die wetenschappers "versterkende terugkoppeling" noemen) hebben zich al eerder op aarde voorgedaan: zo wordt aangenomen dat de ijstijden relatief snel eindigden als gevolg van verster-

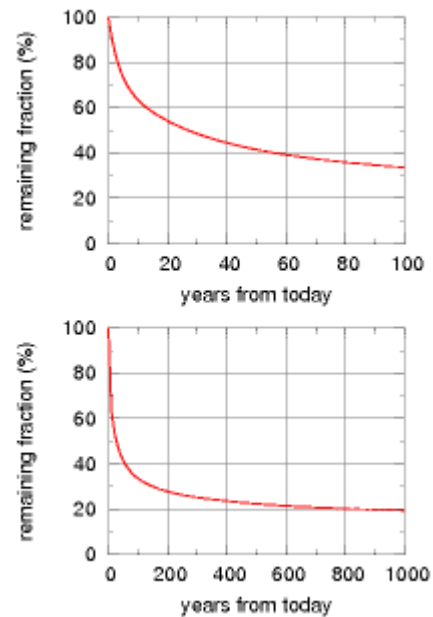


Fig.31.4: Verval van een smalle puls CO₂ die in de atmosfeer van vandaag wordt uitgestoten, volgens het Bern-model van de koolstofcyclus. Bron Hansen et al. (2007).

kende terugkoppeling, waarbij hogere temperaturen sneeuw en ijs deden smelten, waardoor het zonlicht minder door de grond werd weerkaatst, wat betekende dat de grond meer warmte absorbeerde, wat op zijn beurt tot stijgende temperaturen leidde. (Gesmolten sneeuw - water - is veel donkerder dan bevroren sneeuw.) [262] Een andere mogelijkheid voor het versterken van terugkoppelingen waarover men zich zorgen maakt, betreft methaanhyaat, dat bevroren ligt in hoeveelheden van enkele gigatons op plaatsen als Noord-Siberië en in hoeveelheden van honderden gigatons op continentale platten. Bij een opwarming van de aarde boven 1°C kan methaanhyaat smelten, waardoor methaan vrijkomt in de atmosfeer, en dit methaan doet de opwarming van de aarde nog sterker toenemen dan CO₂.

Dit is niet de plaats waar ik nader wil ingaan op de onzekerheden van de klimaatverandering. Ik kan u de boeken *Avoiding Dangerous Climate Change* (Schellnhuber et al., 2006) en *Global Climate Change* (Dessler and Parson, 2006) van harte aanbevelen, en ook de artikelen van Hansen et al. (2007) en Charney et al. (1979).

De bedoeling van dit hoofdstuk is het idee te bespreken van koolstofafvang uit de lucht als remedie tegen klimaatverandering; de energiekosten van deze afvang worden hierna besproken.

De kosten van CO₂ opslag

Tegenwoordig is het *oppompen* van koolstof uit de grond big business. In de toekomst zal het misschien big business zijn om koolstof in de grond te pompen. Ervan uitgaande dat nu niet de juiste maatregelen worden genomen om de wereldwijde vervuiling een halt toe te roepen, zal misschien over enkele tientallen jaren een "coalitie van bereidwilligen" betalen om een grote stofzuiger te bouwen en al het vuil op te ruimen.

Voordat we in detail ingaan op de vraag hoe koolstof uit de lucht kan worden opgevangen, moeten we eerst de onvermijdelijke energiekosten van het opvangen bepalen. Welke technologie we ook gebruiken, we moeten ons houden aan de wetten van de fysica, en helaas is voor het afvangen en concentreren van CO₂ energie nodig. De natuurkundige wetten zeggen dat de benodigde energie ten minste 0,2 kWh per kg CO₂ bedraagt (**Tabel.31.5**). Gezien het feit dat reële processen in het beste geval 35% efficiënt zijn, zou het mij verbazen als de energiekosten van CO₂-afvang ooit onder 0,55 kWh per kg zouden kunnen worden gebracht.

Laten we nu eens aannemen dat we de CO₂-uitstoot van een typische Europeaan willen neutraliseren, 11 ton per jaar, wat neerkomt op 30 kg per dag per persoon. De energie die hiervoor nodig is, ervan uitgaande dat de kosten 0,55 kWh per kg CO₂ bedragen, is **16,5 kWh/d per persoon**. Dat is precies het **elektriciteitsverbruik van het VK**. Om deze reusachtige stofzuiger te laten werken, zou onze elektrici-

teitsproductie dus moeten worden verdubbeld - of zouden wij op zijn minst ergens stroom vandaan moeten halen die gelijkwaardig is aan onze elektriciteitsproductie. Als we de kosten van de reuzenstofzuiger kunnen drukken, laten we dat dan doen. Maar geen enkele hoeveelheid onderzoek of ontwikkeling kan de natuurwetten omzeilen die stellen dat voor het afvangen van CO₂ ten minste 0,2 kWh per kg CO₂ nodig is.

Dus wat is nu de beste manier om CO₂ uit de lucht te zuigen? Ik zal vier technologieën bespreken om een reuzenstofzuiger te bouwen:

- A. chemische pompen
- B. bomen
- C. Versnelde verwerking van rotsen
- D. Oceaanbemesting.

A. Chemische technologieën voor koolstofafvang

Chemische technologieën gaan gewoonlijk op deze manier met CO₂ om:

concentreren compressie
 0,03% CO₂ → zuivere CO₂ → vloeibare CO₂

[263] Eerst concentreer je de CO₂ uit zijn lage concentratie in de atmosfeer; dan pers je het samen tot een klein volume dat je ergens kunt begraven (in een gat in de grond of in de diepten van de oceaan). Elk van de twee stappen heeft een energiekost. De kosten als gevolg van natuurkundige wetten zijn vermeld in **Tabel.31.5**.

	kosten (kWh/kg)
concentratie	0,13
compressie	0,07
totaal	0,20

In 2005 waren de best gepubliceerde methoden om CO₂ uit de lucht op te vangen vrij inefficiënt: de energiekosten bedroegen 3,3 kWh per kg, en de financiële kosten 140 dollar per ton CO₂. Met deze energiekosten is voor het opvangen van de dagelijkse 30 kg van een Europeaan **100 kWh per dag** nodig - bijna evenveel als zijn energieverbruik van 125 kWh/d. Kunnen we betere stofzuigers ontwerpen?

Tabel 31.5: De onontkoombare energiekosten van het concentreren en comprimeren van CO₂ uit de lucht.

Onlangs presenteerde klimatoloog Wallace Broecker, "misschien wel 's werelds beste in het interpreteren van de werking van de aarde als een biologisch, chemisch en fysisch systeem", een tot dan toe onbekende technologie voor het afvangen van CO₂, ontwikkeld door natuurkundige Klaus Lackner: Broecker stelt zich voor dat de aarde in hetzelfde tempo fossiele brandstoffen blijft verbranden als voorheen, en

dat 60 miljoen CO₂-wassers (elk ter grootte van een grote overzeese container) de CO₂ opzuigen. Wat voor soort energie heeft Lackner's proces nodig? In juni 2007 vertelde Lackner me dat zijn lab 1,3 kWh per kg haalde, maar sindsdien hebben ze een nieuw proces ontwikkeld op basis van een rozijn die CO₂ absorbeert als hij droog is en CO₂ afgeeft als hij nat is. Lackner vertelde me in juni 2008 dat hij in een droog klimaat de kosten van concentratie zou hebben teruggebracht tot 0,18-0,37 kWh aan laagwaardige warmte per kg CO₂. Comprimeren kost 0,11 kWh per kg. De totale energiekosten van Lackner bedragen dus 0,48 kWh/kg of minder. Voor de uitstoot van een Europeaan hebben we het nog steeds over **14 kWh/d**, waarvan **3,3 kWh per dag** elektriciteit zou zijn, de rest warmte. Hoera voor de technologische vooruitgang! Maar denk niet dat dat een kleine kost zou zijn. We zouden de wereldenergieproductie met 20% moeten verhogen alleen al om de stofzuigers te laten werken.

B. Hoe zit het met de bomen?

Hoe zit het met de bomen? Bomen zijn koolstofvastleggers: ze zuigen CO₂ uit de lucht, en ze overtreden geen enkele natuurkundige wet. Het zijn twee-in-één machines: het zijn CO₂-afvangsystemen die worden aangedreven door ingebouwde zonne-energiecentrales. Ze leggen CO₂ vast met de energie die ze van het zonlicht krijgen. De fossiele brandstoffen die wij verbranden, zijn oorspronkelijk door dit proces ontstaan. Het idee is dus om het tegenovergestelde te doen van het verbranden van fossiele brandstoffen. Wat dacht je ervan om hout te scheppen en het in een gat in de grond te begraven, terwijl de mensheid een deur verder fossiel hout opgraaft en verbrandt? Het idee lijkt halfbakken om begraven hout op te wekken terwijl je begraven hout opgraaft. Maar laten we eens berekenen hoeveel land er nodig is om het klimaat met bomen te redden.



264] De beste planten in Europa leggen ongeveer 10 ton droog hout per hectare per jaar vast - wat overeenkomt met ongeveer 15 ton CO₂ per hectare per jaar. Om de CO₂-uitstoot per hoofd van de Europese bevolking van 11 ton per jaar te compenseren, is een oppervlakte van 7.500 m² per persoon nodig. Dit is tweemaal zoveel als de oppervlakte per hoofd van de bevolking in Engeland. En dan zou je een plaats moeten vinden waar je permanent 7,5 ton hout per persoon per jaar zou kunnen opslaan! Bij een dichtheid van 500 kg per m³ zou het hout van een persoon 15 m³ per jaar in beslag nemen. Een mensenleven aan hout - dat, vergeet niet, veilig moet worden opgeslagen en niet verbrand - zou 1000 m³ vullen. Dat is vijf keer het volume van een heel huis. Wie voorstelt hout te gebruiken om de klimaatverandering tegen te gaan, moet beseffen dat daarvoor installaties op landschaal nodig zijn. Ik zie niet in hoe dat ooit zou kunnen werken.

C. Verhoogde verwerking van rotsen

Is er een lastige manier om de aanzienlijke energiekosten van chemische CO₂-afvang te vermijden? Hier is een interessant idee: vermaal stenen die CO₂ kunnen absorberen en zet ze in de open lucht. Dit idee kan worden gezien als het versnellen van een natuurlijk geologisch proces. Laat me het uitleggen.

Twee koolstofstromen die ik in **Fig.31.3** had weggelaten zijn die van gesteente naar de oceanen die samenhangen met de verwerking van gesteente, en de natuurlijke neerslag van koolstof in oceaansedimenten die weer gesteente worden. Deze fluxen zijn relatief klein, ongeveer 0,2 Gt C per jaar (0,7 Gt CO₂ per jaar). Zij zijn dus ook te verwaarlozen in vergelijking met de huidige menselijke koolstofemissies, die ongeveer 40 maal groter zijn. Maar de bewering van voorstanders van deze versterkte verwerking is dat we de klimaatverandering kunnen stoppen als we de snelheid versnellen waarmee gesteente breekt en CO₂ absorbeert. Hiervoor zijn onder andere olivijnen of magnesiumsilicaat geschikt, die beide ruim voorhanden zijn. Het idee zou zijn om mijnen te vinden op plaatsen die omgeven zijn door vele vierkante kilometers land waarop het gebroken gesteente kan worden verspreid, of misschien om het gebroken gesteente rechtstreeks in de oceaan te verspreiden. In beide gevallen zou het gesteente CO₂ absorberen en omzetten in carbonaten die uiteindelijk in de oceanen zouden spoelen. Voor het malen van het gesteente tot korrels die klein genoeg zijn, is slechts **0,04 kWh per kg afgevangen CO₂** nodig. Wacht, is dat niet minder dan de 0,20 kWh per kg die de wetten van de fysica voorschrijven? Ja, maar er is niets aan de hand: het gesteente zelf levert de ontbrekende energie: silicaten hebben een hogere energie dan carbonaten, dus het gesteente betaalt voor de energie om de CO₂ te binden. Ik ben dol op de geringe energiekosten van dit proces, maar de moeilijke vraag is, wie is de vrijwilliger om zijn land met steenmeel te laten bedekken?

D. Oceaan Bemesting

Het probleem met deze chemische methoden, methoden om bomen te laten groeien en methoden om rotsen te slijpen om CO₂ af te vangen, is dat ze allemaal veel werk betekenen dat niemand graag doet - zolang een internationale overeenkomst niet voor die afvang betaalt. Op dit moment zijn de CO₂-prijzen te laag.

Een laatste idee voor CO₂-afvang zou dit probleem kunnen omzeilen. Het idee is de oceaan ertoe te bewegen iets sneller dan normaal koolstof op te nemen, als bijproduct van de visteelt. In sommige delen van de wereld zijn er voedseltekorten. In sommige gebieden is er een tekort aan vis als gevolg van de overbevissing in de afgelopen 50 jaar. Het idee van oceaانبemesting is de basis van de voedselketen te versterken, waardoor de oceanen meer plantaardig en dierlijk leven kunnen voortbrengen, waardoor meer koolstof wordt vastgelegd.

[265] Mariene ingenieurs onder leiding van de Australische wetenschapper Ian Jones zouden stikstofhoudende meststoffen zoals ureum willen pompen in geschikte delen van de oceaan waar weinig vis zit. Zij beweren dat een oppervlakte van 900 km² oceaan kan worden bemest om 5 Mt CO₂/j te absorberen. Jones en collega's berekenen dat het bemestingsproces geschikt is voor alle stikstofarme gebieden in de oceaan. Dat omvat het grootste deel van de Noord-Atlantische Oceaan. Laten we dit idee op een kaart tekenen. De Engelse koolstofemissies bedragen 600 Mt CO₂/j. Voor de volledige neutralisatie ervan zouden dus 120 van de bovengenoemde gebieden nodig zijn. De kaart in **Fig.31.6** toont deze gebieden op schaal naast de Britse eilanden. Zoals gewoonlijk zijn voor een plan dat werkt installaties van landformaat nodig. En dan hebben we het nog niet eens gehad over de vraag hoe al het ureum moet worden geproduceerd.

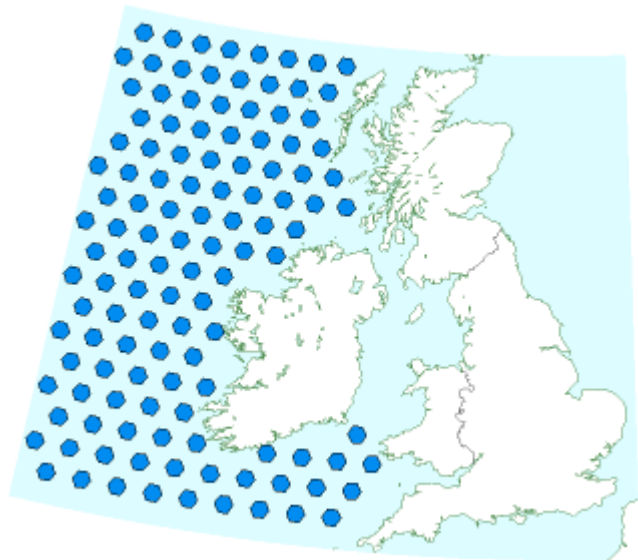


Fig.31.6: 120 gebieden in de Atlantische Oceaan, elk 900 km². Deze vormen de geschatte oppervlakte die nodig is om de Britse emissies van oceaانبemesting te neutraliseren

Hoewel het een onuitgetest idee is, en momenteel illegaal, vind ik oceaانبemesting interessant omdat het, in tegenstelling tot geologische koolstofopslag, een technologie is die kan worden toegepast zonder veel internationaal geld; vissers zouden de oceaan bemesten gewoon om meer vis te vangen.

Voorspeld kan worden dat de commentatoren zich zullen verzetten tegen manipulaties van de oceaan en zich zullen concentreren op de onzekerheden in plaats van op de potentiële voordelen. Zij zullen inspelen op de angst van het publiek voor het onbekende. Mensen zijn bereid om passief een escalatie van een gevestigde praktijk te aanvaarden (bv. het dumpen van CO₂ in de atmosfeer), terwijl ze op hun hoede zijn voor innovaties die hun toekomstig welzijn zouden kunnen verbeteren. Zij hebben een ongelijke afkeer van risico.

Ian Jones

Wij, de mensheid, kunnen niet alle, of zelfs maar de meeste, CO₂ uit fossiele brandstoffen in de atmosfeer lozen. Als we dat wel zouden doen, zou dat een garantie zijn voor dramatische klimaatveranderingen, die een andere planeet zouden opleveren.

J. Hansen et al (2007)

"Het vermijden van gevaarlijke klimaatverandering" is onmogelijk - gevaarlijke klimaatverandering is er al. De vraag is, kunnen we een catastrofale catastrofale klimaatverandering voorkomen?

David King,

Brits hoofdwetenschapper, 2007

[266] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[259]	In sommige kringen is "Bestaat de klimaatverandering?" een controversiële vraag geweest. - 240 klimaatverandering... was een controversiële kwestie. Er is inderdaad nog steeds een "gapende kloof tussen de heersende opinie over klimaatverandering onder de geschoolde elites van Europa en Amerika" [voxbz]. 
[259]	Waar is al die koolstof? - 241 Waar is de koolstof? Bronnen: Schellnhuber et al. (2006), Davidson en Janssens (2006)
[260]	De snelheid waarmee fossiele brandstoffen worden opgebrand - 242 Het tempo van de verbranding van fossiele brandstoffen... Bron: Marland et al. (2007).
[260]	Recent onderzoek suggereert echter dat deze koolstofopname in de oceaan aan het afnemen is - Uit recent onderzoek blijkt dat de koolstofopname door de oceanen wellicht afneemt. www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www-sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofchc], Le Quéré et al. (2007).
[260]	Omdat ongeveer de helft van de koolstofuitstoot in de atmosfeer blijft - uitstoot blijft voor ongeveer de helft in de atmosfeer. Er is 2,1 miljard ton koolstof in de atmosfeer nodig (7,5 Gt CO₂) om de atmosferische CO₂-concentratie met één deeltje per miljoen (1 ppm) te doen stijgen. Als alle CO₂ die we in de atmosfeer pompen daar zou blijven, zou de concentratie met meer dan 3 ppm per jaar stijgen - maar in werkelijkheid stijgt ze slechts met 1,5 ppm per jaar.
[260]	Radioactieve koolstof ... is slechts tot een diepte van 400 m in de oceanen doorgedrongen - Radioactieve koolstof ... is doorgedrongen tot een diepte van slechts ongeveer 400 m. De gemiddelde waarde van de penetratiediepte van bom 14C voor alle waarnemingsplaatsen aan het eind van de jaren zeventig is 390±39 m (Broecker et al., 1995). Uit [3e28ed].
[262]	Opwarming boven 1 °C kan methaanhyaat doen smelten - 244 Opwarming van de aarde met meer dan 1 °C zou methaanhyaaten mogelijk doen smelten. Bron: Hansen et al. (2007, p1942).
[263]	Tabel.31.5 – 245 Tabel.31.5. Onvermijdelijke kosten van het concentreren en comprimeren van CO₂ uit ijle lucht. De onvermijdelijke energiebehoefte om CO₂ te concentreren van 0,03% tot 100% bij atmosferische druk is $kT \ln 100/0,03$ per molecuul, dat is 0,13 kWh per kg. De ideale energiekosten van compressie van CO₂ tot 110 bar (een druk die wordt genoemd voor geologische opslag) is 0,067 kWh/kg. De totale ideale kosten van CO₂-afvang en -compressie bedragen dus 0,2 kWh/kg. Volgens het speciale IPCC-rapport over koolstofafvang en -opslag bedragen de praktische kosten van de tweede stap, compressie van CO₂ tot 110 bar, 0,11 kWh per kg. (0,4 GJ per ton CO₂; 18 kJ per mol CO₂; 7 kT per molecule).
[263]	die dan begraven kan worden in een gat in de grond of in de diepten van de oceaan - 245 De CO₂ in een gat in de grond of diep in de oceaan dumpen. Cf. Williams

	(2000). "Om ervoor te zorgen dat een groot deel van het geïnjecteerde CO ₂ in de oceaan blijft, moet de injectie op grote diepte plaatsvinden. In de ontwikkelingsfase is men het erover eens dat de beste strategie op korte termijn erin bestaat te mikken op injectiedieptes voor CO ₂ van 1000-1500, wat met de bestaande technologie kan worden bereikt." Zie ook het IPCC-verslag: www-ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm . [267]
[263]	In 2005 waren de best gepubliceerde methoden voor het afvangen van CO₂ uit de lucht vrij inefficiënt - In 2005 waren de beste methoden voor koolstofafvang vrij inefficiënt: de energiekosten bedroegen ongeveer 3,3 kWh per kg, met een financiële kostprijs van ongeveer \$140 per ton CO ₂ . Quellen: Keith et al. (2005), Lackner et al. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David and Herzog (2000).
[263]	Klimatoloog Wallace Broecker -Wallace Broecker, klimaatwetenschapper. -. . www-afinfo.or.jp/eng/honor/hot/enrbro.html . Zijn boek ter bevordering van kunstbomen: Broecker en Kunzig (2008).
[264]	De beste installaties in Europa binden ongeveer 10 ton droog hout per hectare per jaar - 246 De beste installaties in Europa vangen koolstof op met een snelheid van ruwweg 10 ton droog hout per hectare per jaar. Bron: Select Committee on Science and Technology.
[264]	Verhoogde verwerking van rotsen - Verbeterde verwerking van gesteenten. Zie Schuiling en Krijgsman (2006).
[264]	Bevruchting van de oceanen - 247 Aanvuring van de oceanen. Zie Judd et al. (2008). Zie ook Chisholm et al. (2001). De risico's van zandsuppleties worden besproken in Jones (2008).

32 zeg ja

Zeg ook ja.

Omdat Engeland momenteel 90% van zijn energie uit fossiele brandstoffen haalt, is het niet verwonderlijk dat het uitfasen van fossiele brandstoffen grote, grote veranderingen vereist - een volledige verandering van het wagenpark, een volledige verandering van de meeste verwarmingsinstallaties in gebouwen, en een 10- tot 20-voudige toename van groene energie.

Gezien de algemene tendens bij het publiek om "nee" te zeggen tegen windmolenparken, "nee" tegen kernenergie, "nee" tegen getijdencentrales - "nee" tegen alles behalve verwarmingsinstallaties op fossiele brandstoffen - maak ik mij zorgen dat wij niet van de fossiele brandstoffen zullen afstappen wanneer dat nodig is. In plaats daarvan hebben we halve maatregelen genomen: iets efficiëntere warmtekrachtcentrales op fossiele brandstoffen, auto's, verwarming van gebouwen; het vijgenblad van een regeling voor de handel in emissierechten; een druppel windturbines; een onevenredig aantal kerncentrales.

We moeten een plan kiezen dat werkt. Het is mogelijk zo'n plan te maken, maar het zal niet gemakkelijk zijn.

We moeten ophouden nee te zeggen en beginnen ja te zeggen. We moeten stoppen met de Punch en Judy en aan het werk gaan.

Als u een oprecht, realistisch energiebeleid wilt dat werkt, zeg dat dan tegen uw politieke vertegenwoordigers en degenen die dat willen zijn. -

dankwoord

Dank aan de auteurs

Voor het leiden van mij in de milieubeweging, dank ik Robert MacKay, Gale Ryba, en Mary Archer.

Voor decennia van intense gesprekken over elk detail, dank aan Matthew Bramley, Mike Cates, en Tim Jervis.

Voor goede ideeën, voor inspiratie, voor het suggereren van goede zinswendingen, voor nuttige kritiek, voor aanmoediging, dank ik de volgende mensen, die allen dit boek hebben gevormd.

John Hopfield, Sanjoy Mahajan, Iain Murray, Ian Fells, Tony Benn, Chris Bishop, Peter Dayan, Zoubin Ghahramani, Kimber Gross, Peter Hodgson, Jeremy Lefroy, Robert MacKay, William Nuttall, Mike Sheppard, Ed Snelson, Quentin Stafford-Fraser, Prashant Vaze, Mark Warner, Seb Wills, Phil Cowans, Bart Ullstein, Helen de Mattos, Daniel Corbett, Greg McMullen, Alan Blackwell, Richard Hills, Philip Sargent, Denis Mollison, Volker Heine, Olivia Morris, Marcus Frean, Erik Winfree, Caryl Walter, Martin Hellman, Per Sillrén, Trevor Whittaker, Daniel Nocera, Jon Gibbins, Nick Butler, Sally Daultrey, Richard Friend, Guido Bombi, Alessandro Pastore, John Peacock, Carl Rasmussen, Phil C. Stuart, Adrian Wrigley, Jonathan Kimmitt, Henry Jabbour, Ian Bryden, Andrew Green, Montu Saxena, Chris Pickard, Kele Baker, Davin Yap, Martijn van Veen, Sylvia Frean, Janet Lefroy, John Hinch, James Jackson, Stephen Salter, Derek Bendall, Deep Throat, Thomas Hsu, Geoffrey Hinton, Radford Neal, Sam Roweis, John Winn, Simon Cran-McGreehin, Jackie Ford, Lord Wilson of Tillyorn, Dan Kammen, Harry Bhadeshia, Colin Humphreys, Adam Kalinowski, Anahita New, Jonathan Zwart, John Edwards, Danny Harvey, David Howarth, Andrew Read, Jenny Smithers, William Connolley, Ariane Kossack, Sylvie Marchand, Phil Hobbs, David Stern, Ryan Woodard, Noel Thompson, Matthew Turner, Frank Stajano, Stephen Stretton, Terry Barker, Jonathan Köhler, Peter Pope, Aleks Jakulin, Charles Lee, Dave Andrews, Dick Glick, Paul Robertson, Jürg Matter, Alan and Ruth Foster, David Archer, Philip Sterne, Oliver Stegle, Markus Kuhn, Keith Vertanen, Anthony Rood, Pilgrim Beart, Ellen Nisbet, Bob Flint, David Ward, Pietro Perona, Andrew Urquhart, Michael McIntyre, Andrew Blake, Anson Cheung, Daniel Wolpert, Rachel Warren, Peter Tallack, Philipp Hennig, Christian Steinrücken, Tamara Broderick, Demosthenis

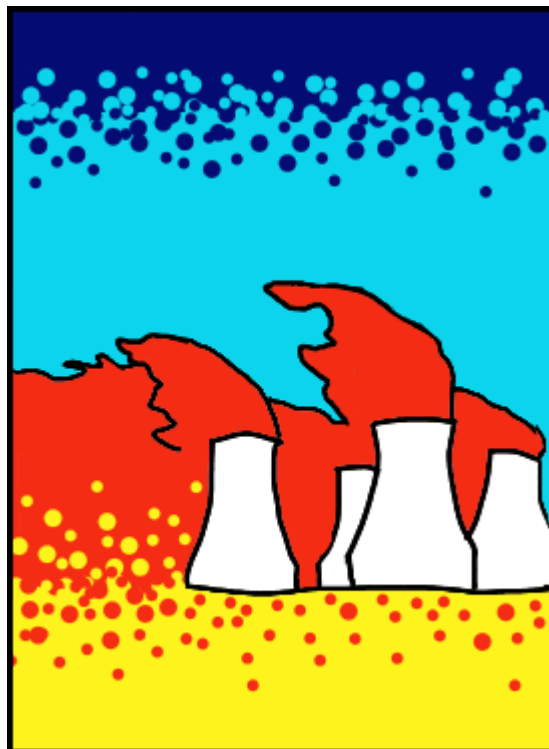
Pafitis, David Newbery, Annee Blott, Henry Leveson-Gower, John Colbert, Philip Dawid, Mary Waltham, Philip Slater, Christopher Hobbs, Margaret Hobbs, Paul Chambers, Michael Schlup, Fiona Harvey, Jeremy Nicholson, Ian Gardner, Sir John Sulston, Michael Fairbank, Menna Clatworthy, Gabor Csanyi, Stephen Bull, Jonathan Yates, Michael Sutherland, Michael Payne, Simon Learmount, John Riley, Lord John Browne, Cameron Freer, Parker Jones, Andrew Stobart, Peter Ravine, Anna Jones, Peter Brindle, Eoin Pierce, Willy Brown, Graham Treloar, Robin Smale, Dieter Helm, Gordon Taylor, Saul Griffith, David Cebonne, Simon Mercer, Alan Storkey, Giles Hodgson, Amos Storkey, Chris Williams, Tristan Collins, Darran Messem, Simon Singh, Gos Micklem, Peter Guthrie, Shin-Ichi Maeda, Candida Whitmill, Beatrix Schlarb-Ridley, Fabien Petitcolas, Sandy Polak, Dino Seppi, Tadas Tokieda, Lisa Willis, Paul Weall, Hugh Hunt, Jon Fairbairn, Miloš T. Kojašević, Andrew Howe, Ian Leslie, Andrew Rice, Miles Hember, Hugo Willson, Win Rampen, Nigel Goddard, Richard Dietrich, Gareth Gretton, David Sterratt, Jamie Turner, Alistair Morfey, Rob Jones, Paul McKeigue, Rick Jefferys, Robin S Berlingo, Frank Kelly, Michael Kelly, Scott Kelly, Anne Miller, Malcolm Mackley, Tony Juniper, Peter Milloy, Cathy Kunkel, Tony Dye, Rob Jones, Garry Whatford, Francis Meyer, Wha-Jin Han, Brendan McNamara, Michael Laughton, Dermot McDonnell, John McCone, Andreas Kay, John McIntyre, Denis Bonnelle, Ned Ekins-Daukes, John Daglish, Jawed Karim, Tom Yates, Lucas Kruijswijk, Sheldon Greenwell, Charles Copeland, Georg Heidenreich, Colin Dunn, Steve Foale, Leo Smith, Mark McAndrew, Bengt Gustafsson, Roger Pharo, David Calderwood, Graham Pendlebury, Brian Collins, Paul Hasley, Martin Dowling, Martin Whiteland, Andrew Janca, Keith Henson, Graeme Mitchison, Valerie MacKay, Dewi Williams, Nick Barnes, Niall - 270 - Mansfield, Graham Smith, Wade Amos, Sven Weier, Richard McMahon, Andrew Wallace, Corinne Meakins, Eoin O'Carroll, Iain McClatchie, Alexander Ac, Mark Suthers, Gustav Grob, Ibrahim Dincer, Ian Jones, Adnan Midilli, Chul Park, David Gelder, Damon HartDavis, George Wallis, Philipp Spöth, James Wimberley, Richard Madeley, Jeremy Leggett, Michael Meacher, Dan Kelley, Tony Ward-Holmes, Charles Barton, James Wimberley, Jay Mucha, Johan Simu, Stuart Lawrence, Nathaniel Taylor, Dickon Pinner, Michael Davey, Michael Riedel, William Stoett, Jon Hilton, Mike Armstrong, Tony Hamilton, Joe Burlington, David Howey, Jim Brough, Mark Lynas, Hezlin Ashraf-Ball, Jim Oswald, John Lightfoot, Carol Atkinson, Nicola Terry, George Stowell, Damian Smith, Peter Campbell, Ian Percival, David Dunand, Nick Cook, Leon di Marco, Dave Fisher, John Cox, Jonathan Lee, Richard Procter, Matt Taylor, Carl Scheffler, Chris Burgoyne, Francisco Monteiro, Ian McChesney, and Liz Moyer. Thank you all. For help with finding climate data, I thank Emily Shuckburgh. I'm very grateful to Kele Baker for gathering the electric car data in **figure 20.21**. I also thank David Sterratt for research contributions, and Niall Mansfield, Jonathan Zwart, and Anna Jones for excellent editorial advice. The errors that remain are of course my own. I am especially indebted to Seb Wills, Phil Cowans, Oliver Stegle, Patrick Welche, and

Carl Scheffler for keeping my computers working. I thank the African Institute for Mathematical Sciences, Cape Town, and the Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, for hospitality. Many thanks to the Digital Technology Group, Computer Laboratory, Cambridge and Heriot–Watt University Physics Department for providing weather data online. I am grateful to Jersey Water and Guernsey Electricity for tours of their facilities. Thank you to Gilby Productions for providing the TinyURL service. TinyURL is a trademark of Gilby Productions. Thank you to Eric Johnston and Satellite Signals Limited for providing a nice interface for maps [www-satsig.net]. Thank you to David Stern for the portrait, to Becky Smith for iconic artwork, and to Claire Jervis for the photos on pages ix, 31, 90, 95, 153, 245, 289, and 325. For other photos, thanks to Robert MacKay, Eric Levin, Marcus Frean, Rosie Ward, Harry Bhadeshia, Catherine Huang, Yaan de Carlan, Pippa Swannell, Corinne Le Quéré, David Faiman, Kele Baker, Tim Jervis, and anonymous contributors to Wikipedia. I am grateful to the office of the Mayor of London for providing copies of advertisements. The artwork on page 240 is “Maid in London,” and on page 288, “Sunflowers,” by Banksy www-banksy.co.uk. Thank you, Banksy! Offsetting services were provided by cheatneutral.com. This book is written in LaTeX on the Ubuntu GNU/Linux operating system using free software. The figures were drawn with gnuplot and metapost. Many of the maps were created with Paul Wessel and Walter Smith’s gmt software. Thank you also to MartinWeinelt and OMC.

Dank aan Donald Knuth, Leslie Lamport, Richard Stallman, Linus Torvalds, en allen die bijdragen aan vrije software. Tenslotte ben ik de grootste dank verschuldigd aan de Gatsby Charitable Foundation, die mij en mijn onderzoeksgroep heeft gesteund voor, tijdens en na het schrijven van dit boek. -

DEEL III theorie

Technische achtergronden



A auto's-II

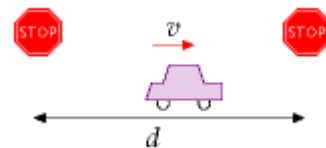
Bijlage A. Auto's II

We hebben geschat dat een auto ongeveer 80 kWh energie nodig heeft om 100 km af te leggen. Waar gaat deze energie heen? Hoe hangt het af van de kenmerken van de auto? Kunnen we 100 keer efficiëntere auto's bouwen? Laten we een eenvoudig model van autorijden schetsen om te beschrijven waar de energie naartoe gaat. De energie van een doorsnee diesel- of benzineauto gaat hoofdzakelijk naar vier plaatsen, die wij alle zullen behandelen:

1. acceleratie, en dan vertraging door de remmen...
2. luchtweerstand
3. rolweerstand
4. warmte - ongeveer 75% van de energie wordt omgezet in nutteloze warmte omdat de energieomzettingssketen inefficiënt is.



Fig.A.1: Een Peugeot 206 heeft een C_w -waarde van 0,33. Foto door Christopher Batt



Afb.A.2: Veronderstelling: een auto rijdt met snelheid v van de ene halte naar de volgende, die afstand d heeft.

Aanvankelijk wordt in ons model geen rekening gehouden met de rolweerstand; dit effect wordt later in dit hoofdstuk toegevoegd. Stel dat de bestuurder snel accelereert tot kruissnelheid v en deze snelheid handhaaft gedurende een afstand d die gelijk is aan de afstand tussen verkeerslichten, stopborden of files. Als hij bij de volgende halte komt, trapt hij op de rem en zet alle kinetische energie in de remmen om in warmte. (De auto gebruikt niet van die rare regeneratieve remmen.) Als hij weer klaar is om te gaan, accelereert hij weer tot kruissnelheid v . Die acceleratie geeft de auto kinetische energie; remmen gooit die kinetische energie weg.

Energie gaat niet alleen in de remmen: als de auto rijdt, wervelt het door de lucht. Een auto laat een buis van wervelende lucht achter zich, stromend met een snelheid vergelijkbaar met v . Welke van deze twee vormen van energie is groter: de kinetische energie in luchtwervelingen of de warmte in remmen? Laten we eens rekenen.

- De auto accelereert en remt eenmaal in het tijdsinterval d/v . De snelheid waarmee energie in de remmen wordt gepompt is

$$\frac{\text{kinetische Energie}}{\text{tijd tussen vertragingen}} = \frac{1/2 m_c v^2}{d/v} = \frac{1/2 m_c v^3}{d}, \quad (\text{A.1})$$

waarbij m_c de massa van de auto is.

[273] De buis van wervelende lucht die door een auto in tijd t wordt geproduceerd heeft volume Avt , waarbij A de dwarsdoorsnede van de buis is, die overeenkomt met het oppervlak gezien vanaf de voorkant (de "voetafdruk"). (Voor een gestroomlijnde auto is A gewoonlijk iets kleiner dan het contactoppervlak A_c van de auto, en de verhouding tussen de effectieve doorsnede van de buis en het contactoppervlak van de auto wordt de luchtweerstandscoefficiënt of c_w -waarde genoemd.

De sleutelformule voor de meeste berekeningen in dit boek is kinetische energie $= 1/2 mv^2$. Voorbeeld: een auto met massa $m=1000$ kg rijdt met snelheid $v = 100$ km/h $= 28$ m/s. Hij heeft dan energie $1/2 mv^2 = 390.000$ J $\approx 0,1$ kWh.



Fig.A.3: Een auto met snelheid v creëert een buis van wervelende lucht achter zich. De doorsnede van de buis is gelijk aan de voetafdruk van de auto en de snelheid waarmee de lucht wervelt is ongeveer v .

Voor de volgende berekeningen betekent A het "effectieve contactoppervlak" van de auto, $c_w A_c$.) De buis heeft een massa van $m_{air} = \rho Avt$ (massa = dichtheid x volume, waarbij ρ (Griekse letter Rho) de dichtheid van lucht aangeeft) en wervelt met snelheid v , dus de kinetische energie is

$$1/2 m_{air} v^2 = 1/2 \rho Avt v^2$$

en de snelheid waarmee kinetische energie wordt opgewekt in de luchtwervelingen is

$$\frac{1/2 \rho Avt v^2}{t} = 1/2 \rho Av^3$$

De totale energieproductie van de auto is dus

$$\begin{aligned} &\text{Vermogen voor remmen} + \text{vermogen voor luchtturbulentie} \\ &= 1/2 m_c v^3 / d + 1/2 \rho Av^3. \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Beide vormen van energiedissipatie schalen met v^3 . Dit model voorspelt dus dat een bestuurder, door zijn snelheid te halveren, zijn energieverbruik (per tijdseenheid) 8 keer zal verminderen. Als hij zijn reis beëindigt na dezelfde afstand te hebben afge-

legd, zal zijn reis twee keer zo lang hebben geduurd, maar de totale energie die voor de reis nodig is, zal vier keer minder zijn.

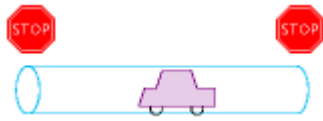


Fig.A.4: Om na te gaan of het energieverbruik door de rem of door de luchtweerstand wordt gedomineerd, vergelijken wij de massa van de auto met de massa van de luchtbus tussen de stopplaatsen.



Fig.A.5: Het energieverbruik van een auto is evenredig met zijn contactoppervlak wanneer hij op de snelweg rijdt en evenredig met zijn massa wanneer hij in de stad rijdt. Wie heeft de betere verbruikscijfers, de VW aan de linkerkant, of het ruimteschip?

Welke van de twee vormen van energiedissipatie - remmen en luchturbulentie - is het grootst? Dat hangt af van de verhouding

$$(m_c/d) / (\rho A)$$

af. Als de verhouding veel groter is dan 1, dan gaat de meeste energie naar de remmen; is de verhouding kleiner, dan gaat meer energie naar de luchtwerbelingen. Als we deze verhouding aanpassen, is hij groter dan 1 wanneer

$$m_c > \rho A d .$$

[274] Maar nu is Ad het volume van de buis met lucht die van de ene halte naar de volgende is gereisd. En ρAd is de massa van dit volume lucht. We hebben dus een vrij eenvoudige situatie: de energiedissipatie wordt gedomineerd door de energiedissipatie tijdens het remmen wanneer de massa van de auto groter is dan de massa van de luchtbus waar hij doorheen gaat van de ene stop naar de volgende; en zij wordt gedomineerd door de luchtwerveling wanneer de massa van de auto kleiner is (**Fig.A.4**). Laten we nu de afstand d^* berekenen tussen de stopplaatsen waarbeneden de dissipatie door de rem wordt gedomineerd en waarboven zij door de werveling (luchtweerstand) wordt gedomineerd. Als het contactoppervlak van de auto

$$A_c = 2 \text{ m breed} \times 1,5 \text{ m hoch} = 3 \text{ m}^2$$

de c_w -waarde $1/3$ heeft en de massa $m_c = 1000 \text{ kg}$, geldt voor

$$d^* = \frac{m_c}{\rho A_c} = \frac{1000 \text{ kg}}{1,25 \text{ kg/m}^3 \times 3 \text{ m}^2} = 267 \text{ m} .$$

$$\rho c W A_c \quad 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1/3 \times 3 \text{ m}^2$$

In het stadsverkeer overheersen dus de kinetische energie en het remmen wanneer de afstand tussen de afzonderlijke haltes minder dan 750 m bedraagt. Onder deze omstandigheden, om energie te besparen is het een goed idee om,

1. Verminder de massa van het voertuig,
2. Gebruik maken van een auto met regeneratieve remmen (die het energieverlies tijdens het remmen ongeveer halveren, zie hoofdstuk 20) en
3. Rij langzamer.

Als de haltes aanzienlijk verder dan 750 m uit elkaar liggen, wordt de energiedissipatie gedomineerd door de luchtweerstand. Dan maakt het nauwelijks uit hoeveel uw voertuig weegt, de energiedissipatie is bijna gelijk of uw auto nu door één of zes personen wordt bezet. Energie kan worden bespaard,

1. Door de luchtweerstand van de auto te verminderen,
2. door het contactoppervlak te verkleinen,
3. door langzamer te rijden.

Het werkelijke energieverbruik van een auto is de energiedissipatie uit vergelijking (A.2), vermeerderd met een factor die de inefficiëntie van motor en transmissie omvat. Typische verbrandingsmotoren hebben een rendement van 25%, dus van de chemische energie die een auto gebruikt, wordt driekwart gebruikt om de motor en de radiator te verwarmen, en gaat slechts een kwart naar "nuttige" energie:

Totaal vermogen van een auto $\approx 4 \left[\frac{1}{2} m_c v^3 / d + \right.$

Laten we deze rijtheorie eens testen aan de hand van redelijke cijfers voor langeafstandsritten. Stel $v = 110 \text{ km/h} = 31 \text{ m/s}$ en $A = c_w A_c = 1 \text{ m}^2$.

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3 = 2 \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ m}^2 \times$$

[275] Als u één uur per dag met deze snelheid rijdt, legt u 110 km af en verbruikt u 80 kWh

Energie per afstand	
Auto n	Weerstandscoefficiënt c_w
Fiets n	<i>Autos:</i>
Vliegtu	Honda Insight 0.25
A380	Prius 0.26
	Renault 25 0.28
	Honda Civic (2006) 0.31
	VW Polo Gti 0.32
	Peugeot 206 0.33
	Ford Sierra 0.34
	Audi TT 0.35
	Honda Civic (2001) 0.36
	Citroën 2CV 0.51
	Wielrijder 0.9
	Touringcar 0.425
	Vliegtuig
	Cessna 0.027
	Learjet 0.022
	Boeing 747 0.031
Eff. frontoppervlak (m^2)	
	Land Rover Discovery 1.6
	Volvo 740 0,81
	Typical car 0.8
	Honda Civic 0.68
	VW Polo Gti 0.65
	Honda Insight 0.47

Tabel.A.7. c_w -waarden en effectieve frontoppervlak

per dag. Als u in plaats daarvan twee uur lang met de helft van de snelheid had gereden, zou u dezelfde afstand hebben afgelegd en slechts 20 kWh energie hebben verbruikt. Deze eenvoudige theorie lijkt te stroken met de verbruikscijfers uit [hoofdstuk 3](#). Bovendien geeft deze theorie aanwijzingen over hoe het energieverbruik van een auto kan worden verminderd. De theorie heeft echter ook enkele zwakke punten, die ik zo dadelijk zal toelichten.

Kunnen we een nieuwe auto bouwen die 100 keer minder energie verbruikt en toch 110 km/u gaat? Nee. Niet als de auto verondersteld wordt dezelfde vorm te hebben. Op de snelweg bij 100 km/u gaat het energieverbruik vooral naar luchturbulentie. Het veranderen van de materialen van de auto maakt daar geen verschil. Een wonderbaarlijke verbetering van de verbrandingsmotor zou het rendement misschien van 25% tot 50% kunnen verhogen en het energieverbruik tot 40 kWh per 100 km kunnen terugdringen.

Elektrische auto's hebben hun verdiensten: Hoewel het gewicht van het energieopslagsysteem per bruikbare opgeslagen kilowattuur ongeveer 25 keer zo hoog is als dat van benzine, kan het gewicht van de elektromotor ongeveer 8 keer lager zijn. En de energieomzetting is ook veel efficiënter in elektrische auto's: Elektromotoren kunnen tot 90% rendement halen.

Op elektrische auto's komen we aan het eind van dit hoofdstuk nog terug.

Fietsen en de schaling truc

Hier is een strikvraag: wat is het energieverbruik van een fiets per 100 km? Voortbewegen op een fiets kost energie om precies dezelfde reden als een auto: je creëert luchtturbulentie. We zouden dezelfde berekeningen opnieuw kunnen doen, waarbij we de gegevens van de auto vervangen door die van de fiets. Maar er is een eenvoudige truc om het antwoord voor de motor uit het antwoord voor de auto te krijgen. Het energieverbruik van de auto per afgelegde afstand is het energieverbruik voor de luchtturbulentie

$$= 4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$$

gedeeld door de snelheid v , d.w.z.

$$\text{Energie per afstand} = 4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2$$

De "4" komt van het motorrendement; ρ is de dichtheid van de lucht, de oppervlakte $A = c_w A_c$ is het effectieve contactoppervlak van het voertuig, en v is de snelheid. Nu kunnen we een fiets vergelijken met een auto door $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$ voor de fiets te delen door $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$ voor de auto. Alle constanten en dichtheden vallen weg als het rendement van de door koolstof aangedreven fiets vergelijkbaar is met dat van de door koolstof aangedreven automotor (wat het geval is). De verhouding is: [275]

$$\frac{\text{Energie per fietsafstand}}{\text{Energie per autoafstand}} = \frac{c_{w, \text{Rad}} A_{\text{Rad}} v_{\text{Rad}}^2}{c_{w, \text{Auto}} A_{\text{Auto}} v_{\text{Auto}}^2}$$

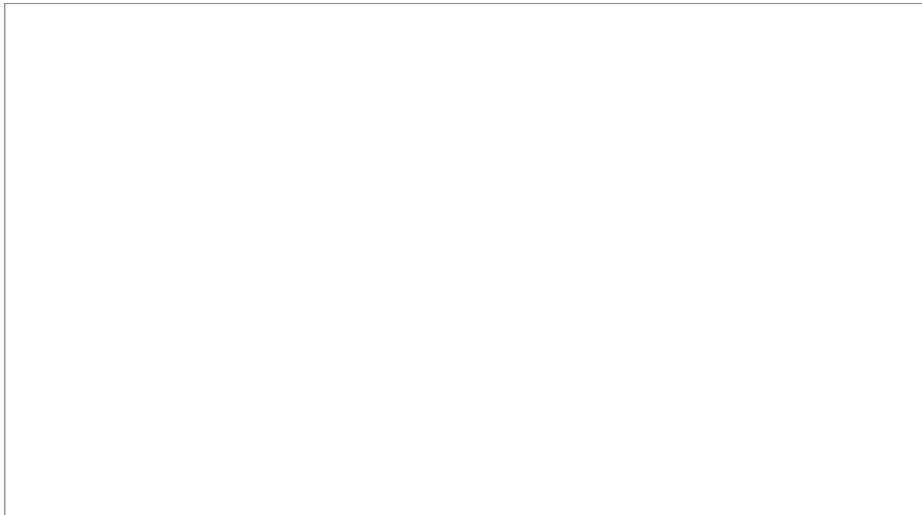
De truc die gebruikt wordt heet schalen. Als we weten hoe het energieverbruik zich verhoudt tot de snelheid en de voetafdruk, kunnen we ook het energieverbruik voorspellen van objecten die totaal verschillende waarden hebben voor snelheid of voetafdruk. Laten we in dit specifieke geval aannemen dat de oppervlakteverhouding

$$\frac{A_{\text{Rad}}}{A_{\text{Auto}}} = \frac{1}{4}$$

(Vier fietsers kunnen schouder aan schouder in de breedte van een personenauto zitten.) Laten we verder aannemen dat de fiets niet bijzonder gestroomlijnd is:

$$\frac{A_{\text{Rad}}}{A_{\text{Auto}}} = \frac{1}{1/3}$$

en de snelheid van de fietser is 22 km/h, dus



Een fietser die 21 km/h rijdt, heeft dus ongeveer 3% van de energie nodig van een automobilist op de snelweg - ongeveer 2,4 kWh per 100 km.

Dus als u op zoek bent naar een voertuig met een brandstofefficiëntie die 30 keer beter is dan die van een auto, ligt het antwoord voor de hand: ga op de fiets.

Tabel.A.8: *De rolweerstand is gelijk aan het gewicht maal de rolweerstandscoefficiënt cR. De rolweerstand omvat de vervormingskrachten van de band, de wrijvingsverliezen in de wiellagers, de schokken en trillingen van zowel het voertuig als de weg (met inbegrip van de door de schokdempers geabsorbeerde energie) en de slip van de banden op de weg of op het spoor. De coëfficiënt verandert naargelang van de wegkwaliteit, het bandenmateriaal en de temperatuur. De hier gegeven cijfers gelden voor gladde wegen. [2bhu35]*

Wiel	cR
Spanning (staal op staal)	0,002
Fietsband	0,005
Vrachtwagenband	0,007
Autoband	0,010

Hoe zit het met de rolweerstand?

Wat we tot nu toe volledig hebben verwaarloosd is de energie die wordt verbruikt in banden en lagers, of de energie die het afroegeluid van de banden op de weg veroorzaakt, of die het rubber van de banden wegspoelt, en ook de energie die voertuigen overdragen op de weg door deze te laten trillen. Samen worden deze energieën de rolweerstand genoemd. Het standaardmodel van de rolweerstand gaat ervan uit dat deze precies evenredig is met het gewicht van het voertuig, ongeacht de snelheid. De evenredigheidsconstante wordt de rolweerstandscoefficiënt of de rolweerstandscoefficiënt cR genoemd. **Tabel.A.8.** geeft enkele typische waarden.

De rolweerstandscoefficiënt van een auto is ongeveer 0,01. Het effect van de rolweerstand is hetzelfde als wanneer je continu een heuvel met een helling van 1% oprijdt. De rolwrijving is ongeveer 100 Newton per ton, ongeacht de snelheid. U kunt dit controleren door een voertuig van 1 ton over een vlakke weg te duwen. Als

hij eenmaal vaart heeft, kun je hem met één hand in beweging houden. (100 Newton is het gewicht van 100 appels.)

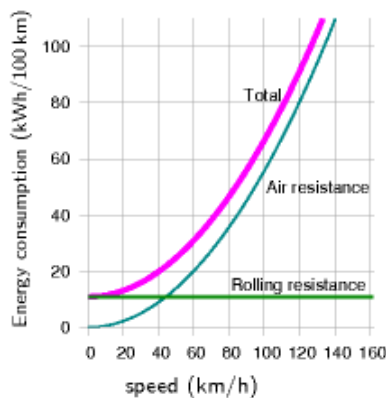


Fig.A.9: Eenvoudige theorie van het brandstofverbruik van een auto (energie per afstand), bij gelijkmatige rij-snelheid. Veronderstellingen: Motorrendement 25% onafhankelijk van toerental, $cW_{Ac} = 1 \text{ m}^2$, $m_c = 1000 \text{ kg}$, $cR = 0,01$.

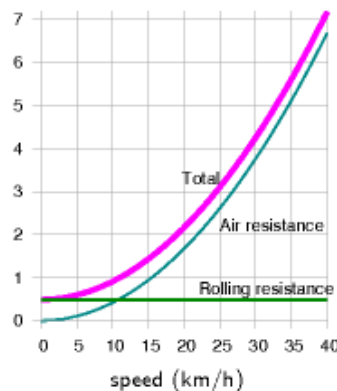


Fig.A.10: Eenvoudige theorie van het brandstofverbruik van fietsen (energie per afstand). De verticale as is het energieverbruik per 100 km. Veronderstellingen: Motorrendement (dat ben jij!) 25%, $cW_{Ac} = 0,75 \text{ m}^2$, massa van berijder + wiel: 90 kg, $cR = 0,005$.

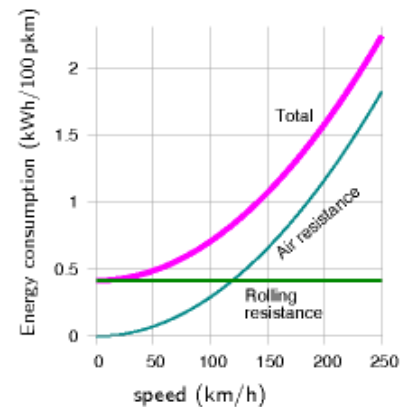


Fig.A.11: Eenvoudige theorie van het brandstofverbruik per reiziger voor een trein van 8 wagons met 584 reizigers. Verticale as: energieverbruik in kWh per 100 p-km. Veronderstellingen: Motorrendement 0,90, $cW_{AZug} = 11 \text{ m}^2$, $m_{Zug} = 400.000 \text{ kg}$, $cR = 0,002$.

Bij een snelheid van 31 m/s (110 km/h), voor een voertuig van 1 ton, is de energie die nodig is om de rolweerstand te overwinnen

$$\text{Kracht} \times \text{snelheid} = (100 \text{ N}) \times (31 \text{ m/s}) = 3.100 \text{ W} ,$$

die, bij een motorrendement van 25%, een motorvermogen van 12 kW vereist, in tegenstelling tot de luchtweerstand, die 80 kW vereist om te overwinnen, zoals wij hierboven op p.274 hebben berekend. Bij hoge snelheden is dus ongeveer 15% van de energie nodig voor rolwrijving.

Fig.A.9 toont de theorie van het brandstofverbruik (energie per afgelegde afstand) als functie van de (constante) snelheid, wanneer de rol- en luchtweerstand worden samengenomen.

[278] De snelheid waarbij de rolweerstand en de luchtweerstand gelijk zijn, wordt gegeven door

$$C_R m_c g = \frac{1}{2} \rho c_w A_c v^2 \text{ also}$$

$$v = \sqrt{2 \frac{c_R m_c g}{\rho c_w A_c}} = 7 \text{ m/s} = 25 \text{ km/h.}$$

Fietsen

Fietsen Bij een fiets ($m=90 \text{ kg}$, $A=0,75 \text{ m}^2$) vindt de overgang van rijden met overheersende rolweerstand naar rijden met overheersende luchtweerstand plaats bij ongeveer 12 km/h. Bij een constante snelheid rond 20 km/u kost fietsen ongeveer 2,2 kWh per 100 km. Door een aerodynamisch gunstige houding aan te nemen, kunnen de luchtweerstand en het contactoppervlak zodanig worden verminderd dat het energieverbruik daalt tot 1,6 kWh per 100 km.

Treinen

Voor een trein van 8 wagons zoals afgebeeld in fig.20.4 ($m=400.000 \text{ kg}$, $A=11 \text{ m}^2$) is de luchtweerstand groter dan de rolweerstand bij een snelheid van

$$v = 33 \text{ m/s} = 120 \text{ km/h.}$$

Met slechts één wagon ($m=50.000 \text{ kg}$, $A=11 \text{ m}^2$), is de limiet

$$v = 12 \text{ m/s} = 43 \text{ km/h.}$$

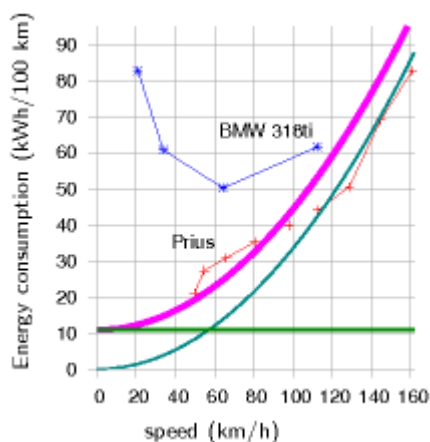
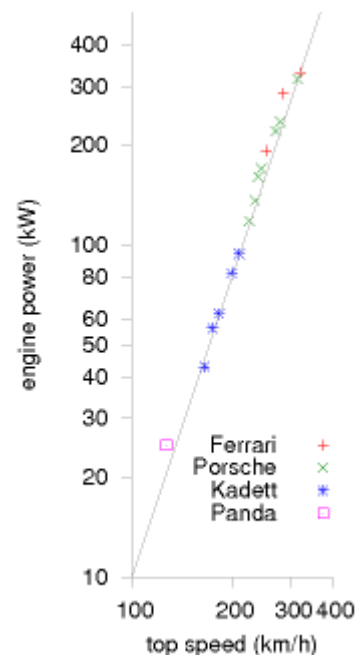


Fig.A.12: (boven) Het brandstofverbruik van de huidige auto's neemt niet toe met het kwadraat van de snelheid. Prius gegevens van B. Z. Wilson, BMW gegevens van Phil C. Stuart. De vloeiende lijn geeft aan hoe een v^2 -curve eruit zou zien, uitgaande van een effectieve voetafdruk van $0,6 \text{ m}^2$.

Fig.A.13: (rechts) Vermogen van auto's (kW) vs. maximumsnelheid (in km/h). Beide schalen zijn logaritmisch. Het vermogen neemt toe met de derde macht van de snelheid. Voor twee keer zo snel is acht keer zoveel motorvermogen nodig. Uit Tennekes (1997)



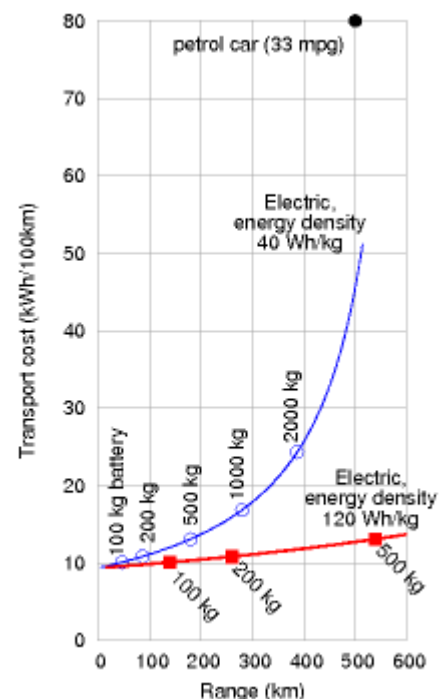
Snelheidsafhankelijkheid van energie

Als ik zeg dat een halvering van de rij snelheid het verbruik (in L per 100 km) tot een kwart moet terugbrengen, kijken sommigen sceptisch. Zij hebben een goed argument: de meeste automotoren hebben een optimaal toerental, en de gekozen versnelling bepaalt het toerental waarbij het motorrendement optimaal is. In mijn gedachte-experiment, als ik de snelheid halveer, kan de auto buiten dat optimale snelheidsbereik vallen, en daarom zou de besparing minder dan 4x kunnen zijn. Mijn stilzwijgende veronderstelling dat de motorefficiëntie bij alle snelheden en alle belastingssituaties dezelfde zou zijn, leidde tot de conclusie dat het altijd beter zou zijn (in termen van brandstofbesparing) om langzamer te rijden; maar als de motorefficiëntie afneemt bij lage snelheden, zou de meest brandstofefficiënte snelheid een middenweg moeten zijn, een compromis tussen langzaam rijden en de motor in het optimale toerentalbereik houden. Voor de BMW 318ti in **Fig.A.12** zou de optimale snelheid bijvoorbeeld 60 km/u zijn. Indien de samenleving echter besluit dat de snelheid van voertuigen moet worden verlaagd, [279] staat niets eraan in de weg dat ook de motoren opnieuw worden ontworpen om bij de juiste snelheid een optimaal rendement te bereiken. Een andere indicatie van de evenredigheid tussen de vereiste energie en de derde macht van de snelheid wordt geïllustreerd in **Fig.A.13**: Het toont motorvermogen versus topsnelheid voor een verscheidenheid van auto's. De uitgezette lijn toont de relatie "energie evenredig met v^3 ."

Elektrische auto's: is actieradius een probleem?

Mensen zeggen vaak dat de actieradius van elektrische voertuigen niet lang genoeg zou zijn. Voorstanders van e-auto's zeggen "geen probleem, we kunnen gewoon grotere batterijen plaatsen" - en dat is waar, maar we moeten wel nagaan welk effect die extra batterijen hebben op het energieverbruik.

Fig.A.14: *Theorie van de actieradius van elektrische auto's (horizontale as) en transportkosten (verticale as) als functie van de massa van de batterij, voor twee batterijtechnologieën. Een auto met 500 kg oude batterijen, met een energiedichtheid van 40 Wh/kg, heeft een actieradius van 180 km. Met hetzelfde gewicht van moderne batterijen, met 120 Wh/kg, heeft de elektrische auto een bereik van meer dan 500 km. In beide gevallen bedragen de energiekosten ongeveer 13 kWh per 100 km. De cijfers hebben betrekking op een batterijlaadefficiëntie van 85%.*



Het antwoord hangt in belangrijke mate af van de energiedichtheid van de batterijen. Voor een energiedichtheid van 40 Wh/kg (typisch voor loodzuur-batterijen),

zullen we zien dat het moeilijk is om de actieradius te vergroten tot meer dan 200 of 300 km. Maar voor energiedichtheden rond 120 Wh/kg (typisch voor diverse lithiumbatterijen) is een afstand van 500 km geen probleem.

Laten we aannemen dat de massa van het voertuig met inzittenden 740 kg bedraagt, zonder batterijen. Wij zullen dan achtereenvolgens 100 kg, 200 kg, 500 kg of misschien 1000 kg batterijen toevoegen. Laten we verder uitgaan van een typische snelheid van 50 km/h, een effectieve voetafdruk van 0,8 m², een rolweerstand van 0,01, een gemiddelde afstand tussen stopplaatsen van 500 m, een motorefficiëntie van 85%, en een terugwinning van 50% van de kinetische energie van het voertuig bij het stoppen door gebruik te maken van regeneratief remmen. Het opladen van de auto via het stopcontact zou 85% efficiënt moeten kunnen zijn. **Fig.A.14** toont de transportkosten van het voertuig over zijn actieradius als we de grootte van de batterij in het voertuig variëren. De bovenste curve toont het resultaat voor batterijen met een energiedichtheid van 40 Wh/kg (ouderwetse loodzuur-accu's). Het bereik is beperkt tot ongeveer 500 km. Om in de buurt van die limiet te komen, moeten we ongelooflijk grote batterijen gebruiken: Voor een actieradius van 400 km zou bijvoorbeeld 2000 kg batterijen nodig zijn, en de transportkosten zouden meer dan 25 kWh per 100 km bedragen. Als we tevreden zijn met een bereik van 180 km, kunnen we dat doen met 500 kg batterijen. Het begint er een stuk beter uit te zien als je de lichtere lithium-ion batterijen gebruikt. Met een energiedichtheid van 120 Wh/kg kunnen auto's gemakkelijk meer dan 500 km afleggen met accu's van 500 kg. De transportkosten zouden dan 13 kWh per 100 km bedragen.

Het lijkt mij dus dat het probleem van de actieradius al is opgelost door de beschikbaarheid van moderne accu's. [280] Het zou zeker mooi zijn om nog betere batterijen te hebben, maar een energiedichtheid van 120 Wh/kg is al voldoende zolang we tevreden zijn met - 500 kg batterijen in auto's. In de praktijk zouden de meeste mensen waarschijnlijk tevreden zijn met een straal van 300 km, wat kan worden bereikt met accu's van 250 kg. Als deze accu's zouden worden verdeeld in blokken van elk 25 kg, die afzonderlijk kunnen worden verwijderd, zou een automobilist die alleen de gebruikelijke forenzenroute rijdt, slechts 4 van de 10 blokken aan boord kunnen nemen (100 kg geeft 140 km) en nog eens 6 blokken uit het laadstation kunnen halen, alleen als hij een langere reis plant. Voor een lange afstandsrit moeten de accu's ongeveer om de 300 km worden vervangen door een nieuwe set bij een elektrisch laadstation.

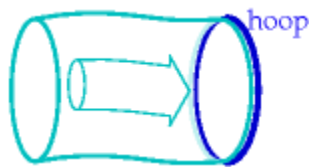
Noten en literatuurverwijzingen

Pagina	
[274]	met regeneratieve remmen, die het energieverlies tijdens het remmen ongeveer halveren - Regeneratieve remmen halveren ruwweg de energie die verloren gaat bij het remmen. Quelle: E4tech (2007).
[274]	Typische verbrandingsmotoren hebben een rendement van 25% – 256 Typische benzinemotoren hebben een rendement van ongeveer 25%. Encarta [6by8x] zegt: "Het rendement van moderne benzinemotoren ligt tussen 20 en 25%" De benzinemotor in de Toyota Prius, beroemd als een van de meest efficiënte auto's, maakt gebruik van de Atkinson-cyclus in plaats van de Otto-cyclus; hij heeft een piekvermogen van 52 kW en een rendement van 34% bij 10 kW [348whs]. De efficiëntste dieselmotor ter wereld heeft een rendement van 52%, maar hij is niet geschikt voor auto's omdat hij 2.300 ton weegt: De Wartsila-Sulzer RTA96- C turbodiesel (Fig.A.15) is ontworpen voor containerschepen en levert 80 MW.  Fig.A.15: De Wartsila-Sulzer RTA96- C 14-cilinder tweetakt dieselmotor. 27 m lang en 13,5 m hoog. (114.800 pk. 102 omw/min. rendement 52%) www-wartsila.-com
[275]	het gewicht van de elektrische auto kan ongeveer 8 maal lichter zijn – 257 Elektrische motoren kunnen ongeveer 8 maal lichter zijn dan benzinemotoren. Een 4-takt benzinemotor heeft een vermogen/massa-verhouding van ongeveer 0,75 kW/kg. De beste elektrische motoren hebben een rendement van 90% en een vermogen/massa-verhouding van 6 kW/kg. Dus het vervangen van een 75 kW benzinemotor door een 75 kW elektromotor scheelt 85 kg gewicht. Helaas is de verhouding tussen het vermogen en de massa van batterijen ongeveer 1 kW per kg, zodat je op de batterijen weer verliest wat je op de motor wint.
[275]	het rendement van de met koolstof aangedreven fietser – 259 De motor van de fiets gebruikt energie met een rendement van 0,25. Deze en andere veronderstellingen over fietsen worden bevestigd in di Prampero et al. (1979). Het effectieve contactoppervlak van een wielrenner in wedstrijdhouding is $cWA = 0,3 \text{ m}^2$. De rolweerstand van een hoogwaardige racefiets (totaalgewicht 73 kg) bedraagt 3,2 N.
[278]	Fig.A.12 – 260 Prius-gegevens van B. Z. Wilson [home.hiwaay.net/~bzwilson/prius/]. BMW gegevens van Phil C. Stuart [www-randomuseless.info/318ti/economy.html].
	Verder lezen: Gabrielli en von Kármán (1950).

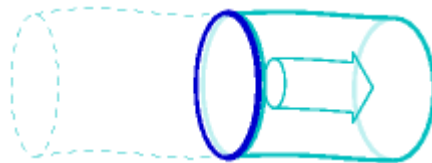
B wind-II

De fysica van windenergie

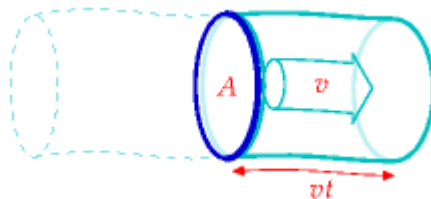
Om de energie in de wind te schatten, veronderstellen we dat we een windmolen met oppervlakte A omhoog houden, die blootgesteld is aan wind met snelheid v . We berekenen de massa lucht die per seconde door de windmolen gaat. Hier is een afbeelding van de lucht net voor hij door de windmolen gaat:



De volgende is het beeld van dezelfde luchtmassa een seconde later:



De massa van dit stuk lucht is het product van zijn dichtheid ρ , zijn oppervlakte A , en zijn lengte, die v maal t is, waarbij t gelijk is aan één seconde.



De kinetische energie van dit stukje lucht is (ook hier gebruik ik de formule massa = dichtheid x volume)

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho A v t v^2 = \frac{1}{2}\rho A t v^3. \quad (\text{B.1})$$

De kracht van de wind op een oppervlak A - dat is de kinetische energie die per

tijdseenheid door dat oppervlak waait - is dus

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (\text{B.2})$$

Deze formule komt ons bekend voor - we hebben een identieke uitdrukking afgeleid op blz. [346] bij de bespreking van het energieverbruik van een rijdend voertuig.

Wat is een typische windsnelheid? Op een winderige dag kan een fietser de windrichting rechtstreeks waarnemen; als de wind van achteren komt, ga je veel sneller dan normaal; de windsnelheid is dus vergelijkbaar met die van een fietser die pakweg 21 km/h (6 m/s) rijdt. In Cambridge waait het maar af en toe zo hard. Laat mij dit niettemin als een typisch cijfer voor Engeland gebruiken (zonder uit het oog te verliezen dat wij onze ramingen misschien zullen moeten herzien).

[282]

miles/ uur	km/h	m/s	Beaufort schaal
2.2	3.6	1	kracht 1
7	11	3	kracht 2
11	18	5	kracht 3
13	21	6	kracht 4
16	25	7	
22	36	10	kracht 5
29	47	13	kracht 6
36	58	16	kracht 7
42	68	19	kracht 8
49	79	22	kracht 9
60	97	27	kracht 10
69	112	31	kracht 11
78	126	35	kracht 12

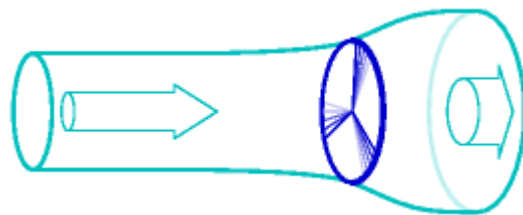


Fig.B.2: (boven) Luchtstroom na een windmolen. De lucht wordt afgeremd en geëxpandeerd door de windmolen.

Fig.B.1: (links) Snelheden

De dichtheid van lucht is ongeveer 1,3 kg per m³. (Ik rond dit meestal af op 1 kg/m³ omdat dat gemakkelijker te onthouden is, maar hier heb ik niet afgerond). Het typische windvermogen per vierkante meter windturbine is.

$$\frac{1}{2}\rho v^3 = \frac{1}{2}1,3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2. \quad (\text{B.3})$$

Een windmolen kan niet al deze energie onttrekken. De windmolen vertraagt de luchtstroom aanzienlijk, maar hij moet wel wat kinetische energie voor de lucht overlaten, anders zit de vertraagde lucht in de weg. **Fig.B.2** toont een schets van de werkelijke luchtstroom na een windmolen. De maximale fractie energie die een windmolen uit een inkomende luchtstroom kan halen, werd in 1919 berekend door de Duitse natuurkundige Albert Betz. Als de uitgaande wind $1/3$ is van de snelheid van de inkomende wind, dan is het onttrokken vermogen $16/27$ van het totale vermogen. $16/27$ is 0,59. Laten we voor praktische doeleinden aannemen dat windmolens 50% efficiënt zijn. In feite zijn windmolens ontworpen voor specifieke windsnelheden; als de werkelijke windsnelheid aanzienlijk hoger is dan de ideale snelheid van de turbine, moet deze worden stilgezet. Voor een rekenvoorbeeld gaan wij uit van een diameter van 25 m en een naafhoogte van 32 m, hetgeen ruwweg de afmetingen zijn van de enkele staande windturbine boven de stad Wellington, Nieuw-Zeeland (zie **fig.B.3**). De kracht van deze enkele windmolen is



Afb.B.3: De Brooklyn windmolen bij Wellington, Nieuw Zeeland, met mensen ter vergelijking op schaal. Op een winderige dag genereerde deze windmolen 60 kW (1400 kWh/d). Foto door Philip Banks

[283] Efficiëntie x vermogen per oppervlakte-eenheid x oppervlakte

$$= 50\% \times \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{B.4})$$

$$= 50\% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4} (25 \text{ m})^2 \quad (\text{B.5})$$

$$= 34 \text{ kW}. \quad (\text{B.6})$$

Toen ik de windmolen op een zeer winderige dag bezocht, gaf de meter van de generator een werkelijk vermogen van 60 kW aan.

Om te kunnen schatten hoeveel stroom we uit de wind kunnen halen, moeten we nog bepalen hoe groot onze windmolens kunnen worden en hoe dicht we ze op elkaar kunnen zetten.

Hoe dicht kunnen windmolens op elkaar staan? Te dichtbij, en degenen die bovenwinds zijn creëren een windschaduw voor degenen achter hen. Deskundigen zeggen dat windmolens niet dichter dan 5 keer hun diameter kunnen staan zonder aanzienlijke prestatievermindering. (Zie **Fig.B.4**) Op deze afstand kunnen windmolens een vermogen per landoppervlakte produceren van

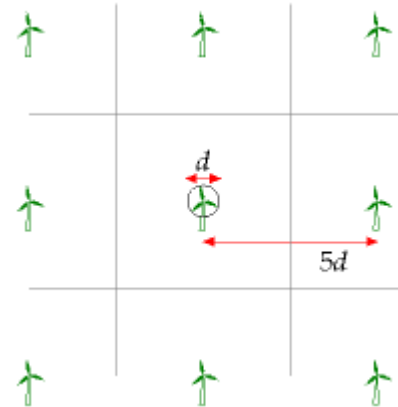


Fig.B.4: Lay-out windpark

$$\frac{\text{Vermogen per windmolen}}{\text{Oppervlakte per windmolen}} = \frac{\frac{1}{2} \rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} \quad (\text{B.7})$$

$$= \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{B.8})$$

$$= 0,016 \times 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.9})$$

$$= 2,2 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.10})$$

Dit is een getal om in gedachten te houden: een windmolenpark met een windsnelheid van 6 m/s genereert 2 W per m² landoppervlak. Merk op dat deze waarde niet afhangt van de diameter van de windturbines. De d's zijn ingekort omdat grotere windmolens verder uit elkaar moeten staan. Grotere windmolens zijn een goed idee als het erom gaat te profiteren van de hogere windsnelheden die op grotere hoogte boven de grond heersen (hoe hoger een windmolen, hoe meer windsnelheden hij gebruikt), of uit economische overwegingen. Deze twee argumenten zijn echter ook de enige die voor grote windmolens pleiten.

Vermogen per oppervlakte-eenheid

Windpark (wind 6 m/s)	2 W/m ²

Tabel B.5: Feiten om te onthouden:
Windparken

De berekeningen zijn sterk afhankelijk van de veronderstelde windsnelheden. Zijn 6 m/s typische snelheden in winderige gebieden in Engeland op de lange termijn? **Fig.4.1** en **Fig.4.2** tonen de windsnelheden in Cambridge en Cairngorm. **Fig.B.6** toont gemiddelde winter- en zomerwindsnelheden voor acht andere locaties in Engeland. Ik ben bang dat 6 m/s een te hoge schatting was voor de typische snelheid in het grootste deel van Engeland! [284] Als we de 6 m/s vervangen door de 4 m/s van Bedford, moeten we onze schattingen naar beneden bijstellen, tot $(4/6)^3 \approx 0,3$ (omdat vermogen met windsnelheid tot de macht 3 schaalt).

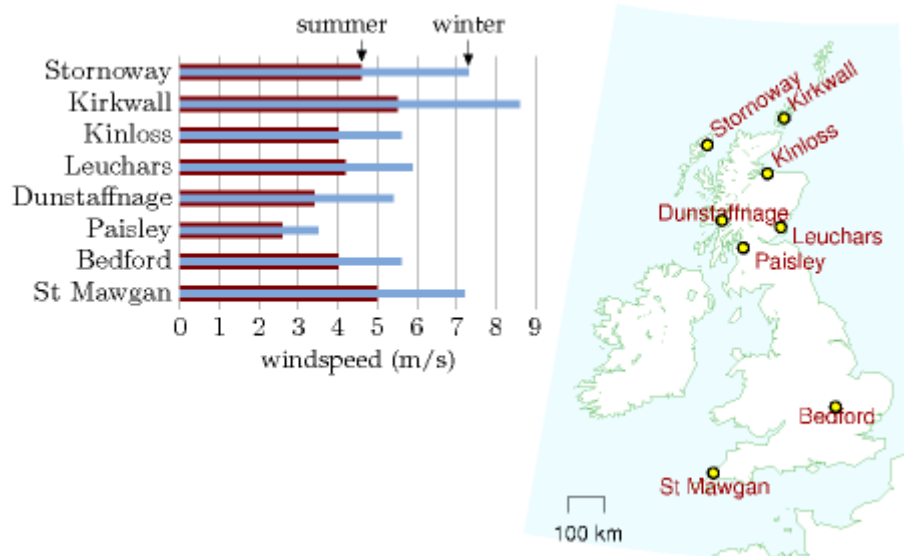


Fig.B.6: Gemiddelde zomerse (donkerrode staaf) en winterse (lichtblauwe staaf) windsnelheden op acht plaatsen in Engeland, gemeten op de standaard weerstationhoogte van 10 m. Gemiddelde waarden over 1971-2000.

Om daarentegen het gemiddelde typische vermogen te schatten, moeten wij niet de gemiddelde windsnelheid nemen en deze tot de derde macht verheffen, maar het gemiddelde van de windsnelheid tot de derde macht verheffen. Het gemiddelde van de machten is groter dan de overeenkomstige macht van het gemiddelde. Maar als we zo gedetailleerd te werk willen gaan, wordt het nog ingewikkelder omdat echte windturbines geen vermogen produceren dat evenredig is met v^3 . In feite hebben zij een snelheidsbereik waarin zij het theoretisch mogelijke vermogen leveren; bij hogere of lagere snelheden leveren echte turbines minder dan het theoretisch mogelijke vermogen.

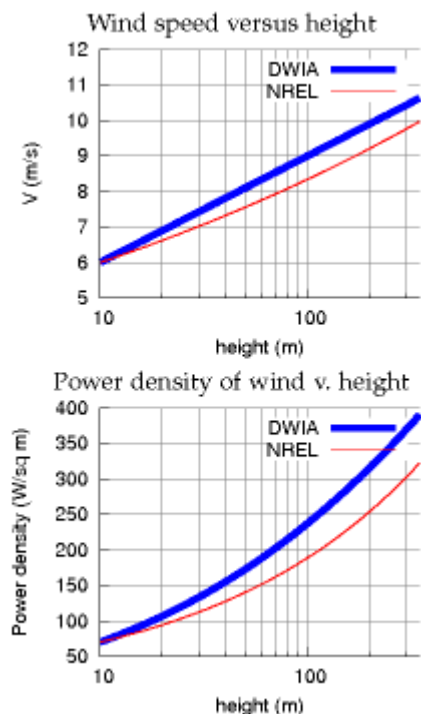


Fig.B.7: (boven): Twee modellen voor windsnelheid en windvermogen als functie van de hoogte. DWIA=Danish Wind Industry Association; NREL=National Renewable Energy Laboratory. Voor beide modellen werd de snelheid op 10 m verondersteld 6 m/s te zijn. Voor het Deense windmodel werd de ruwheidslengte vastgesteld op 0,1 m. (onder): De energiedichtheid (vermogen per verticaal oppervlak) volgens beide modellen.

Variatie van de windsnelheid met de hoogte

Hogere windmolens zien hogere windsnelheden. De wijze waarop de windsnelheid toeneemt als functie van de hoogte is gecompliceerd en hangt af van de [285] ruwheid van het omringende terrein en het tijdstip van de dag. Als vuistregel geldt dat een verdubbeling van de hoogte de windsnelheid met 10% doet toenemen en dus het vermogen met 30%.

Enkele standaardformules voor snelheid v als functie van hoogte z zijn:

1. Volgens de NREL windscheringsformule [ydt7uk] varieert de snelheid met een macht van de hoogte:

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha,$$

waarbij v_{10} de snelheid op 10 m hoogte is en een typische waarde voor de exponent α 0,143 of $1/7$ is. De één-zevende wet ($v(z)$ evenredig met $z^{1/7}$) wordt bijvoorbeeld ook gebruikt door Elliott et al. (1991).

2. De windscheringsformule van de Deense Wind Industrie Associatie [yaoonz] is

$$v(z) = v_{\text{ref}} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)},$$

Waarbij z_0 een parameter is die ruwheidslengte wordt genoemd en v_{ref} de snelheid is op een referentiehoogte z_{ref} zoals 10 m. De ruwheidslengte voor typische landschappen (landbouwgrond met enkele huizen en heggenbiotopen op een afstand van enkele 500 m van elkaar - "ruwheidsklasse 2") is $z_0 = 0,1$ m.

In de praktijk geven de twee formules numeriek gelijke resultaten. Dit betekent echter niet dat zij altijd juist zijn. Van den Berg (2004) vermoedt dat er vaak andere windprofielen voorkomen, vooral 's nachts.

Kenmerken van standaard windmolens

De huidige standaard windturbines hebben een rotordiameter van 54 meter en een naafhoogte van 80 meter; een dergelijke machine heeft een "vermogen" van 1 MW. De "capaciteit" of het "piekvermogen" is het maximale vermogen dat de windmolen onder optimale omstandigheden kan opwekken. Turbines zijn gewoonlijk ontworpen om te starten bij windsnelheden van 3-5 m/s en uit te schakelen bij stormen van meer dan 25 m/s. Het werkelijk geleverde vermogen is de "capaciteit" vermenigvuldigd met een factor die het deel van de tijd aangeeft waarin bijna-optimale

omstandigheden heersen. Deze factor, die vaak de "belastingsfactor" of "capaciteitsfactor" wordt genoemd, is afhankelijk van de locatie. Een typische belastingsfactor voor een goede locatie in Engeland is 30%. In Nederland is de typische belastingsfactor 22%, in Duitsland 19%.



Fig.B.8: De qr5 van *quietrevolution.co.uk*. Niet een typische windmolen.

286] Schattingen van andere auteurs van de output van windmolenparken per oppervlakte-eenheid.

In een studie van de regering [www-world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf] worden de Engelse on-shore windreserves geraamd op maximaal 9 W/m² (capaciteit, niet gemiddeld vermogen). Met een capaciteitsfactor van 33% zou dit neerkomen op een gemiddelde energieproductie van 3 W/m².

De "London Array" is een off-shore windmolenpark dat gepland is voor de buitenste monding van de Theems. Met een capaciteit van 1 GW zal dit naar verwachting het grootste windmolenpark ter wereld worden. Het zal bestaan uit 271 turbines op een oppervlakte van 245 vierkante km [6086ec] en een gemiddelde productie van 3100 GWh per jaar (350 MW) opleveren. (Kostprijs 1,5 miljard pond) Dat is een vermogensdichtheid van $350 \text{ MW} / 245 \text{ km}^2 = 1,4 \text{ W/m}^2$. Dit is minder dan bij andere offshore-parken omdat, naar ik vermoed, deze locatie een groot kanaal bevat (Knock Deep) dat te diep is (ongeveer 20 m) voor economisch levensvatbare grondbevestigingen van turbines.

Ik maak me meer zorgen over wat deze plannen [voor het voorgestelde windmolenpark London Array] met dit landschap en onze manier van leven zullen doen dan ik ooit heb gedaan over een nazi-invasie op het strand.

Bill Boggia van Graveney, waar de onderzeese kabels van het windmolenpark aan land zullen komen.

Vragen

Hoe zit het met micro-windturbines? Als je zo'n miniturbine op je dak zet, hoeveel energie kun je er dan van verwachten?

Uitgaande van een windsnelheid van 6 m/s, wat zoals gezegd al boven de gemiddelde windsnelheid in Engeland ligt, en een veronderstelde diameter van 1 m, zou het verwachte vermogen 50 W zijn. Dat is 1,3 kWh per dag - niet te veel. En in de reële omgeving van een typische Engelse stedelijke nederzetting levert zo'n turbine slechts 0,2 kWh per dag - zie blz. [076].



Fig.B.9: Een Ampair "600W" microturbine. Het gemiddelde vermogen dat door deze microturbine in Lemington Spa wordt opgewekt, bedraagt 0,037 kWh per dag (1,5 W).

Misschien wel de slechtste windmolens ter wereld zijn die in Tsukuba City, Japan, die in feite meer energie verbruiken dan ze leveren. De exploitanten waren zo ontdaan door de voortdurend stilstaande turbines dat zij er energie in staken om ze te laten draaien en het tenminste te doen lijken alsof ze werkten! [6bkvbn]



Fig.B.10: Een Iskra 5 kW turbine [www-iskra-wind.com] met een diameter van 5,5 m die jaarlijks onderhoud ondergaat. Deze turbine staat in Hertfordshire (niet een van de winderigste plaatsen in Engeland) op een hoogte van 12 m en heeft een gemiddeld vermogen van 11 kWh per dag. Een windmolenpark met machines van dit vermogen, elk op 30 m x 30 m, zou een energiedichtheid per oppervlakte-eenheid van 0,5 W/m² hebben.

[287] Opmerkingen en Referenties

Pagina	
[282]	De maximale fractie energie die een windmolen uit een inkomende luchtstroom kan halen – 264 De maximale fractie van de inkomende energie die kan worden onttrokken door een schijfvormige windmolen... Een zeer mooie uitleg is te vinden op de website van de Deense Wind Industrie Associatie [yekdaa].
[285]	De turbines zijn gewoonlijk ontworpen om te starten bij windsnelheden van 3-5 m/s - 267 Usually, wind turbines are designed to start running at wind speeds around 3 to 5 m/s. [ymfbsn].
[285]	Een typische belastingsfactor voor een goede locatie in Engeland is 30%. – een typische belastingsfactor voor een goede site is 30%. In 2005 bedroeg de gemiddelde belastingsfactor van de grotere Engelse windparken 28% [ypvbvd]. De bezettingsgraad varieerde gedurende het hele jaar, met een minimum van 17% in juni en juli. De bezettingsgraad van de beste locaties - Caithness, Orkney en de Shetlandeilanden - bedroeg 33%. De belastingsfactoren voor de twee offshore-windmolenparken die in 2005 in bedrijf waren, bedroegen 36% voor North Hoyle (voor de kust van Noord-Wales) en 29% voor Scroby Sands (voor de kust van Great Yarmouth). De gemiddelde LoadFactors voor de volgende tien regio's waren (2006): Cornwall 25%; Mid-Wales 27%; Cambridgeshire en Norfolk 25%; Cumbria 25%; Durham 16%; Zuid-Schotland 28%; Orkney en Shetlandeilanden 35%; Noordoost-Schotland 26%; Noord-Ierland 31%; offshore 29%. [wbd8o] Volgens Watson et al. (2002) wordt een gemiddelde jaarlijkse windsnelheid van 7,0 m/s noodzakelijk geacht voor de economische exploitatie van een windmolenpark. Ongeveer 33% van Engeland heeft zulke windsnelheden.

C vliegtuigen-II

Bijlage C: vliegtuigen-II

Wat we moeten doen is kijken hoe we het luchtvervoer energie-efficiënter kunnen maken, hoe we de nieuwe brandstoffen kunnen ontwikkelen waarmee we minder energie kunnen verbranden en minder kunnen uitstoten.

Tony Blair

Hopen op het beste is geen beleid, het is een waanidee.

Emily Armistead, Greenpeace

Wat zijn de fundamentele beperkingen van vlieg-reizen? Vereisen de natuurkundige wetten van het vliegen onvermijdelijke hoeveelheden energie, per ton, per gevlogen kilometer? Wat is de maximale afstand die een Boeing 747 van 300 ton kan vliegen? Wat dat van een grutto van 1 kg, of een noordse stern van 100 g?

Net zoals [hoofdstuk 3](#), waarin we het brandstofverbruik van auto's hebben geschat, werd voortgezet via [aanhangel A](#), zo is dit hoofdstuk bedoeld om het denken uit [hoofdstuk 5](#) voort te zetten en te belichten waar de energie in het vliegen naartoe gaat. De enige natuurkundige formules die hiervoor nodig zijn, zijn de bewegingswetten van Newton, die ik waar nodig zal uitleggen.

Deze berekeningen zullen ons in staat stellen vragen te beantwoorden als "zou de luchtvaart veel minder brandstof verbruiken als we in tragere propellervliegtuigen reisden?" We hebben nog veel vergelijkingen in het verschiet. Ik hoop dat u ervan geniet!

Hoe vlieg je?

Vliegtuigen (en vogels) bewegen door de lucht en ondervinden daarbij een luchtweerstand, net als au-



Fig.C.1: Vogels: twee noordse sterns, een grutto, een Boeing 747.

to's of treinen; veel van de energie die een vliegtuig nodig heeft, wordt verbruikt door het vliegtuig tegen die kracht in voort te stuw. Bovendien hebben vliegtuigen, in tegenstelling tot auto's of treinen, energie nodig om overeind te blijven.

Vliegtuigen blijven overeind door lucht naar beneden te duwen. Wanneer een vliegtuig lucht naar beneden duwt, duwt die lucht het vliegtuig omhoog (omdat de derde wet van Newton dat voorschrijft). Zolang deze opwaartse druk, lift genoemd, groot genoeg is om het neerwaarts trekkende gewicht van het vliegtuig op te heffen, zal het vliegtuig kunnen voorkomen neer te storten. Als het vliegtuig lucht naar beneden duwt, geeft het die lucht kinetische energie. Dus het creëren van lift vereist energie. Het totale vermogen dat een vliegtuig nodig heeft, is de som van het vermogen dat nodig is om lift te produceren en het vermogen dat nodig is om de luchtweerstand te overwinnen. [289] (Overigens wordt het vermogen dat nodig is voor lift ook wel "geïnduceerde weerstand" genoemd. Maar ik noem het hier liftkracht Plift).

De twee vergelijkingen die we nodig hebben om de vliegtheorie uit te werken zijn de tweede wet van Newton:

$$\text{Kracht} = \text{snelheid van verandering van momentum} \quad (\text{C.1})$$

en de derde wet van Newton die hierboven al genoemd is

$$\text{Kracht van A op B} = - \text{Kracht van B op A} . \quad (\text{C.2})$$

Als je niet van vergelijkingen houdt, kan ik je nu de clou vertellen: We gaan ontdekken dat de kracht die nodig is voor lift gelijk is aan de kracht die nodig is om weerstand te overwinnen. Dus de eis van "overeind blijven" verdubbelt de benodigde kracht.

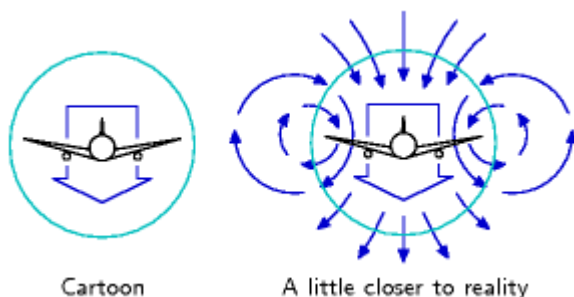


Fig.C.3: *Ons model gaat ervan uit dat het vliegtuig in zijn zog een worst van lucht achterlaat die zich naar beneden beweegt. Een realistisch beeld impliceert een complexere wervelende stroming. De werkelijke omstandigheden zijn te zien in Fig.C.4.*

Laten we een model maken voor de lift van een vliegtuig met snelheid v . In een tijd t vliegt het vliegtuig verder over de afstand vt en laat daarbij een worst van neerwaarts stromende lucht achter zich (**Fig.C.2**). De dwarsdoorsnede van deze worst noemen we A_s . De diameter van de worst is ongeveer gelijk aan de spanwijdte van het vliegtuig. (Binnen deze worst bevindt zich een kleinere worst van wervelende

lucht met een doorsnede die vergelijkbaar is met de oppervlakte van de romp van het vliegtuig). In feite zijn de details van de luchtwervelingen veel interessanter dan het worstbeeld: elke vleugeltip laat een werveling achter waarin de lucht binnen de vleugeltip snel naar beneden stroomt, en de lucht voorbij (buiten) de vleugeltip naar boven (**Fig.C.3 en C.4**). Deze opwaartse luchtstroom wordt door vogels gebruikt wanneer ze in formatie vliegen: Net achter de vleugeltips van de vogel is een mooie kleine opwaartse luchtstroom. Hoe dan ook, terug naar onze worsten.

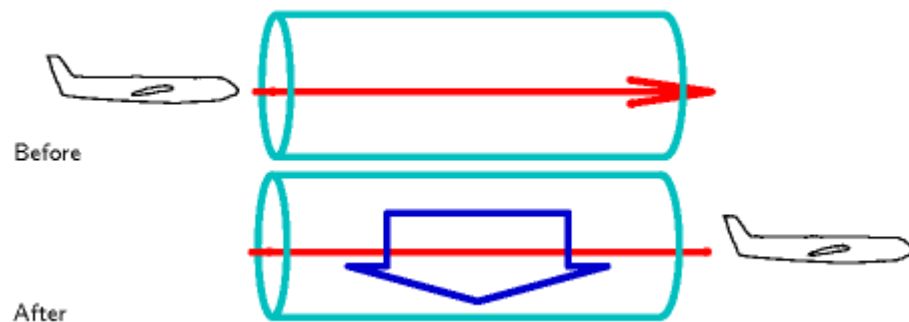


Fig.C.2: Een vliegtuig vliegt door een buis van lucht. Als het vliegtuig erdoor is, is de lucht naar beneden geduwd. De kracht die het vliegtuig op de lucht uitoefende om het naar beneden te versnellen is gelijk en tegengesteld aan de opwaartse kracht die de lucht op het vliegtuig uitoefende.

[290] De massa van de worst is

$$m_{\text{worst}} = \text{dichtheid} \times \text{volume} = \rho \, v t \, A_s. \quad (\text{C.3})$$

Stel dat de hele worst met snelheid u naar beneden beweegt en bepaal nu hoe groot u moet zijn opdat het vliegtuig een kracht ondervindt gelijk aan zijn gewicht mg . Het neerwaartse momentum van de worst, gegenereerd op tijdstip t , is

$$\text{Massa} \times \text{snelheid} = m_{\text{worst}} \, u = \rho \, v t \, A_s \, u. \quad (\text{C.4})$$

En volgens de wet van Newton moet dit momentum gelijk zijn aan het momentum opgewekt door de gewichtskraft die op het tijdstip t op het vliegtuig inwerkt, namelijk

$$mgt. \quad (\text{C.5})$$

Na herschikking van deze vergelijking volgt

$$\rho \, v t \, A_s \, u = mgt, \quad (\text{C.6})$$

die we kunnen oplossen voor de neerwaartse snelheid van de worst die we zoeken:

$$u = \frac{mg}{\rho v A_s} .$$

Interessant. De snelheid van het worstje is omgekeerd evenredig met de snelheid v van het vliegtuig. Een langzaam vliegend vliegtuig moet de lucht harder omlaag duwen dan een snel vliegtuig, omdat het per tijdseenheid minder lucht raakt. Dit is ook de reden waarom landingsvliegtuigen die langzaam vliegen hun kleppen uitschuiven: Zo ontstaat een grotere en steilere vleugel, die de lucht harder naar beneden duwt.



Fig.C.4: *Luchtstroming achter een vliegtuig. Foto van NASA Langley Research Center.*

Wat is nu de energiekost van dit neerwaarts duwen van de worst met de vereiste snelheid u ? Het benodigde vermogen is .

$$P_{lift} = \frac{\text{kinetische Energie der Wurst}}{\text{Zeit}} \quad (C.7)$$

$$= \frac{1}{t} \frac{1}{2} m_{Wurst} u^2 \quad (C.8)$$

$$= \frac{1}{2t} \rho v t A_s \left(\frac{mg}{\rho v A_s} \right)^2 \quad (C.9)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_s} . \quad (C.10)$$

Het totale vermogen dat een vliegtuig nodig heeft om te vliegen is de som van het weerstandsvermogen en het liftvermogen:

$$P_{ges} = P_{Luftwiders \tan d} + P_{lift} \quad (C.11)$$

$$= \frac{1}{2} c_w \rho A_F v^3 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v A_s} , \quad (C.12)$$

waarbij A_F het contactvlak van het vliegtuig is en c_w de luchtweerstandscoefficiënt (zoals in [aanhangsel A](#)). De brandstofefficiëntie van het vliegtuig, uitgedrukt in energie per afstand, zou dan zijn

$$\left. \frac{\text{Energie}}{\text{Afstand}} \right|_{\text{ideal}} = \frac{P_{ges}}{v} = \frac{1}{2} c_w \rho A_F v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \quad , \quad (\text{C.13})$$

wanneer het vliegtuig het vermogen van zijn brandstof omzet in luchtweerstand en liftvermogen met een efficiëntie van 100%. (In feite is een andere naam voor "energie per afgelegde afstand" gewoon "kracht" en we kunnen de twee termen hierboven ook identificeren als luchtweerstandskracht $\frac{1}{2} c_w \rho A_F v^2$ (*1) en liftkracht $1(mg)^2/2\rho v^2 A_S$ (*2). De som van deze krachten, de "stuwkracht", beschrijft precies hoeveel de motoren moeten duwen).

Echte vliegtuigmotoren hebben een rendement van ongeveer $\varepsilon = 1/3$, dus de werkelijke energie die een vliegtuig met snelheid v nodig heeft is

$$\frac{\text{Energie}}{\text{Afstand}} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{1}{2} c_w \rho A_F v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \right) \quad . \quad (\text{C.14})$$

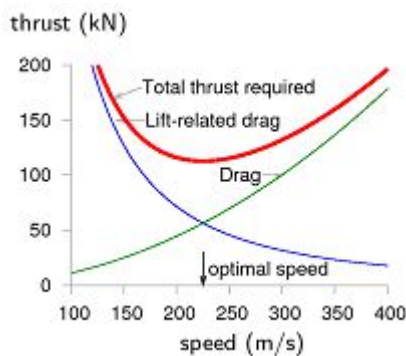


Fig.C.5: De kracht die nodig is om een vliegtuig in beweging te houden, als functie van snelheid v , is de som van de gewone luchtweerstandskracht $\frac{1}{2} c_w \rho A_F v^2$ - die toeneemt met hogere snelheid - en de liftkracht (ook geïnduceerde luchtweerstand genoemd) $\frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S}$ - die afneemt met hogere snelheid. Er is een ideale snelheid v_{opt} waarbij de kracht minimaal wordt. Aangezien kracht/energie per afstand is, minimaliseert men samen met kracht ook de brandstof per afstand. Om de brandstofefficiëntie te optimaliseren, vlieg bij v_{opt} . De grafiek toont de modelberekening van de vereiste stuwkracht, in kN, voor een Boeing 747, massa 319 t, spanwijdte 64,4 m, $c_w = 0,03$, voetafdruk 180 m^2 , bij luchtdichtheid $0,41 \text{ kg/m}^3$ (gelijk aan 10 km hoogte), als functie van snelheid v in m/s. Ons model geeft een optimale snelheid van $v_{opt}=220 \text{ m/s}$. Voor een model gebaseerd op worsten, een goede match met de realiteit!

ren, vlieg bij v_{opt} . De grafiek toont de modelberekening van de vereiste stuwkracht, in kN, voor een Boeing 747, massa 319 t, spanwijdte 64,4 m, $c_w = 0,03$, voetafdruk 180 m^2 , bij luchtdichtheid $0,41 \text{ kg/m}^3$ (gelijk aan 10 km hoogte), als functie van snelheid v in m/s. Ons model geeft een optimale snelheid van $v_{opt}=220 \text{ m/s}$. Voor een model gebaseerd op worsten, een goede match met de realiteit!

Deze uitdrukking voor energie-per-afstand is betrekkelijk ingewikkeld, maar zij wordt aanzienlijk eenvoudiger als wij aannemen dat een vliegtuig is ontworpen om het energieverbruik per afstand bij zijn gebruikelijke kruissnelheid te minimaliseren. De energie-per-afstand heeft een optimum als functie van v , zoals te zien is in **Fig.C.5**. De som van de twee hoeveelheden is het kleinst wanneer beide bovengenoemde hoeveelheden (*1) en (*2) gelijk zijn. Dit is een aangenaam verschijnsel in zowel de natuurkunde als de werktuigbouwkunde: twee grootheden die uiteraard niet gelijk hoeven te zijn, zijn in feite gelijk, of op zijn minst vergelijkbaar binnen een factor 2. Dit gelijkheidsprincipe vertelt ons dat de optimale snelheid van een vliegtuig de vergelijking

$$c_W \rho A_F v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \quad (\text{C.15})$$

vervuld d.w.z.

$$\rho v_{opt}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_W A_F A_S}} \quad (\text{C.16})$$

Dit bepaalt de optimale snelheid als ons vluchtmodel nauwkeurig is; het model faalt als het motorrendement ε sterk van de snelheid afhangt of als de luchtsnelheid hoger is dan de geluidssnelheid (330 m/s), [292] want daarboven heeft men een ander model voor luchtweerstand en lift nodig.

Laten we het model controleren door de voorspellingen voor de optimale luchtsnelheid van een 747 en een albatros te evalueren. We moeten voorzichtig zijn om de juiste luchtdichtheid te gebruiken wanneer we dit doen: Als we de optimale luchtsnelheid voor een 747 op 30.000 voet willen bepalen, moeten we er rekening mee houden dat de luchtdichtheid met toenemende hoogte z afneemt als $\exp(-mgz/kT)$, waarbij m de massa van stikstof- of zuurstofmoleculen is en kT de thermische energie (Boltzmann-constante maal absolute temperatuur). De dichtheid is ongeveer drie keer lager op deze hoogte.

De voorspelde optimale snelheden (**Tabel.C.6**) zijn nauwkeuriger dan we hadden kunnen verwachten! De optimale snelheid van de 747 is berekend op 220 m/s (800 km/u) en die van de albatros op 14 m/s (50 km/u) - beide zeer dicht bij de werkelijke kruissnelheden van de twee vogels (respectievelijk 895 km/u en 50-80 km/u).

Vogel		747	Albatros
Ontwerper		Boeing	natuurlijke selectie
Massa (volbeladen) m		363 000 kg	8 kg
Spanwijdte w		64,4 m	3,3m
Voetafdruk* A_F		180 m ²	0,09m ²
Dichtheid ρ		0,4 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Luchtweerstand c_W		0,03	0,1
Snelheid v_{opt}		220 m/s = 540 mph	14m/s = 32mph

Tabel C.6: Schatting van de optimale luchtsnelheid voor een jumbojet en een albatros. * Het frontoppervlak van de 747 is berekend aan de hand van de cabinebreedte (6,1 m) maal de geschatte romphoogte (10 m) maal twee voor vleugels, turbines en staart; het frontoppervlak van de Albatros is aan de hand van een foto geschat op 1 vierkante voet.

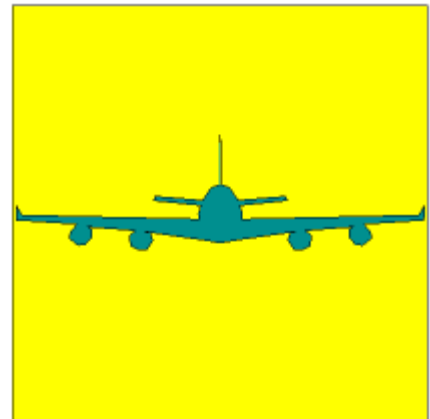


Fig.C.7: Vooraanzicht van een Boeing 747, om het contactoppervlak A_F van het vliegtuig te schatten. Het gele vierkant heeft oppervlakte A_S (spanwijdte in het kwadraat).

Laten we nog enkele voorspellingen van ons model bekijken. We kunnen vergelijken of de kracht uit Eq. (C.13) vergelijkbaar is met de bekende stuwkrachtverhouding van de 747. Bedenk dat onder optimale omstandigheden de twee krachten gelijk zijn, zodat we slechts één ervan hoeven te berekenen en te verdubbelen:

$$\text{Kracht} = \frac{\text{Energie}}{\text{Afstand}} \bigg|_{\text{ideal}} = \frac{1}{2} c_w \rho A_F v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_S} \quad (\text{C.17})$$

$$= c_w \rho A_F v_{opt}^2 \quad (\text{C.18})$$

$$= c_w \rho A_F \frac{mg}{\rho (c_w A_F A_S)^{1/2}} \quad (\text{C.19})$$

$$= \left(\frac{c_w A_F}{A_S} \right)^{1/2} mg. \quad (\text{C.20})$$

Wij willen de vulfactor f_A definiëren als de oppervlakteverhouding

$$f_A = \frac{A_F}{A_S}. \quad (\text{C.21})$$

[293] (Zie f_A als het deel van de oppervlakte van het vierkant van **fig.C.7** dat door het vliegtuig wordt bestreken). Dan

$$\text{Kraft} = (C_w f_A)^{1/2} (mg). \quad (\text{C.22})$$

Interessant. Ongeacht de dichtheid van de vloeistof waar doorheen wordt gevlogen, is de vereiste stuwkracht (voor een vliegtuig bij zijn optimale snelheid) slechts een dimensieloze constante $(C_w f_A)^{1/2}$ maal het gewicht van het vliegtuig.

Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
Stern	12
Albatros	20

Tabel.C.8: Glijverhoudingen

Deze constante, een maat voor de luchtweerstandstandverhouding van het vliegtuig, is overigens het omgekeerde van de zogenaamde glijverhouding, die belangrijk is bij de constructie van vliegtuigen (zij komt overeen met de verhouding lift-luchtweerstand en is in de Engelstalige literatuur ook bekend als "lift-to-drag-ratio" of kortweg "L/D", "aerodynamic efficiency" of "finesse"; enkele typische waarden staan vermeld in **Tabel.C.8**).



Fig.C.9: Cessna 310N: 60 kWh per 100 p-km. Een Cessna 310 Turbo vervoert 6 passagiers (inclusief piloot) bij een snelheid van 370 km/u. Foto door Adrian Pingstone.

Uitgaande van de cijfers $c_W \approx 0,03$ en $f_A \approx 0,04$ van de jumbo, berekenen we de vereiste stuwkracht als volgt

$$(C_W f_A)^{1/2} m g = 0,036 m g = 130 \text{ kN.} \quad (\text{C.23})$$

Hoe past dit in de specificaties van de 747? In feite heeft elk van de vier motoren een stuwkracht van 250 kN, maar deze maximale stuwkracht wordt alleen gebruikt tijdens het opstijgen. Tijdens de vlucht is de stuwkracht veel lager: voor een 747 is deze 200 kN, ongeveer 50% hoger dan onze modelberekening. Het model wijkt een beetje af omdat onze aanname voor de inverse glijverhouding een beetje te laag was.

Deze stuwkracht kan rechtstreeks worden gebruikt om de transportefficiëntie van een vliegtuig te bepalen. Hier kan onderscheid worden gemaakt tussen twee soorten efficiëntie: De energiekosten voor het vervoer van gewicht, gemeten in kWh per t-km, en de energiekosten voor het vervoer van personen, gemeten in kWh per 100 p-km.

Efficiëntie in termen van gewicht

Stuwkracht is een kracht, en kracht is energie per afstandseenheid. De totale energie die per afstandseenheid nodig is, is groter met een factor $1/\varepsilon$, waarbij ε de efficiëntie van de machine is, die wij wederom op 1/3 stellen.

Dit is de totale transportkost ^{Q40}, gedefinieerd als de energie per gewichtseenheid (van het hele vliegtuig) per afstandseenheid:

[294]

$$\text{Transportkosten} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}} \quad (\text{C.24})$$

$$= \frac{1}{\varepsilon} \frac{(c_W f_A)^{1/2} m g}{m} \quad (\text{C.25})$$

$$= \frac{(c_W f_A)^{1/2}}{\varepsilon} g. \quad (\text{C.26})$$

De vervoerskosten zijn dus slechts een dimensieloze grootheid (afhankelijk van de vorm van het vliegtuig en de efficiëntie van zijn aandrijving) vermenigvuldigd met de versnelling ten gevolge van de zwaartekracht g . Deze formule voor de totale transportkosten geldt voor alle vliegtuigen en is slechts afhankelijk van drie eenvoudige eigenschappen van het vliegtuig: zijn c_W -waarde, zijn vorm en zijn voortstuwings efficiëntie. Het hangt niet af van de grootte van het vliegtuig, noch van het

40) ^{Q40} Hier, en ook in het onderstaande, worden met "kosten" altijd de energiekosten bedoeld.

gewicht, noch van de dichtheid van de lucht. Als we $\varepsilon = 1/3$ stellen en uitgaan van een glijverhouding van 20, levert ons model voor elk vliegtuig een transportkost op van

$$0,15 \text{ g}$$

of (voor de omrekening zie aanhangsel I)

$$0,4 \text{ kWh/t-km}$$



Fig.C.10: "Doe je veiligheidsmanchetknopen om!"
Een Bombardier Learjet 60XR vervoert 8 passagiers bij 780 km/u tegen transportkosten van 150 kWh per 100 p-km. Foto door Adrian Pingstone.



Fig.C.11: Boeing 737-700: 30 kWh per 100 p-km. Foto © Tom Collins

Kunnen vliegtuigen worden verbeterd?

Als het motorrendement slechts in beperkte mate kan worden verbeterd door technologische vooruitgang, en de vorm van het vliegtuig al grotendeels perfect is, dan kan er weinig worden gedaan aan deze dimensieloze grootheid. De vervoersefficiëntie nadert haar fysische grens. Volgens specialisten op het gebied van aërodynamica kan enige winst worden geboekt door gebruik te maken van de zogenoemde blended wing body (BWB)-vorm en kan de luchtweerstand worden verminderd door gebruik te maken van de zogenoemde laminar flow control (LFC)-techniek, waarbij lucht bijvoorbeeld door kleine openingen in het vleugeloppervlak wordt aangezogen, waardoor de vorming van turbulentie achter de vleugels wordt onderdrukt (Braslow, 1999). Het upgraden van bestaande vliegtuigen met LFC zou hun c_w -waarde met ongeveer 15% verbeteren, en een c_w -waardeverbetering van 18% wordt voorspeld voor de overgang naar BWB-vormen (Green, 2006). En vergelijking (C.26) zegt dat de transportkosten evenredig zijn met de vierkantswortel van de c_w -waarde, zodat de bovenvermelde verbeteringen van 15% en 18% resulteren in een kostenvermindering van respectievelijk 7,5% en 9%.

De totale transportkosten zijn de energiekosten per verplaatst gewicht, inclusief het gewicht van het vliegtuig. Om de energiekosten voor het verplaatsen van vracht per gewichtseenheid vracht te bepalen, moeten we delen door de fractie die de vracht uitmaakt van het totale gewicht. Een volgeladen Boeing 747 vrachtvliegtuig is ongeveer 1/3 vracht, dus zijn transportkosten zijn

0,45 g

of ongeveer 1,2 kWh/t-km. Dit is iets hoger dan dat van een vrachtwagen, dat 1 kWh/t-km bedraagt.

Efficiëntie van het vervoer in termen van passagiers

Op dezelfde manier kunnen we nu de efficiëntie van een 747 bij het vervoer van passagiers bepalen:

Vervoersefficiëntie (p-km per liter brandstof)

$$= \text{Aantal passagiers} \times \frac{\text{Energie per liter}}{\text{Stuwkracht}} \quad (\text{C.27})$$

$$\text{Aantal passagiers} \times \frac{\varepsilon \times \text{Energie per liter}}{\text{Stuwkracht}} \quad (\text{C.28})$$

$$= 400 \times \frac{1}{3.200.000 \text{ N}} \frac{38 \text{ MJ/L}}{1} \quad (\text{C.29})$$

$$= 25 \text{ p - km per Liter} \quad (\text{C.30})$$

Dit is iets efficiënter dan een auto met één inzittende (12 km/l). Met het vliegtuig reizen is dus energie-efficiënter dan autorijden zolang er maar één of twee mensen in de auto zitten; en autorijden is energie-efficiënter dan vliegen als er drie of meer mensen in de auto zitten.

Belangrijkste punten

We hebben nu een heleboel problemen opgelost. Laat me de kernideeën nog eens samenvatten. Voor de helft van het vliegen moet je overeind blijven, voor de andere helft moet je in beweging blijven. Wij vonden dat de brandstofefficiëntie bij de optimale snelheid, uitgedrukt in energie-per-reisafstand, in de kracht (C.22) lag, die eenvoudig evenredig was met het gewicht van het vliegtuig; de constante van evenredigheid was de inverse glijverhouding, bepaald door de vorm van het vliegtuig. In tegenstelling tot auto's, waar lagere snelheidsbeperkingen het energieverbruik per afstand kunnen verminderen, is er geen reden om de snelheid van vliegtuigen te beperken. Vliegtuigen hebben hun optimale snelheden in de lucht, elk vliegtuig heeft zijn, afhankelijk van het gewicht, en zij vliegen reeds met die optimale snelheden. Als vliegtuigen langzamer zouden moeten vliegen, zou dat hun brandstofverbruik verhogen. De enige manier om vliegtuigen zuiniger te maken is ze aan de grond te laten staan. Vliegtuigen zijn fantastisch geoptimaliseerd, en er is geen vooruitzicht op aanzienlijke verbeteringen in hun efficiëntie. (Zie blz. 40 en 149 voor een verdere bespreking van de bewering dat nieuwe superjumbo's "veel efficiënter" zijn dan oude, en blz. 39 voor de bewering dat turboprops "veel efficiënter" zouden zijn dan

straalvliegtuigen).

Bereik

Een andere modelvoorspelling die we kunnen maken is het bereik van een vliegtuig of vogel - wat is de verste afstand die het kan afleggen zonder bij te tanken? Men zou kunnen veronderstellen dat grotere vliegtuigen een groter bereik zouden hebben, maar de voorspelling van ons model is verrassend eenvoudig. De actieradius van een vliegtuig, de afstand die het kan afleggen zonder bij te tanken, is evenredig met

[296] zijn snelheid en de totale energie van de brandstof, en omgekeerd met de snelheid van het verbruik:

$$\text{Afstand} = v_{\text{opt}} \frac{\text{Energie}}{\text{Vermogen}} = \frac{\text{Energie} \times \varepsilon}{\text{Kracht}}. \quad (\text{C.31})$$

Nu is de totale energie slechts de calorische waarde C van de brandstof (in joule per kg) maal de massa ervan; en de massa van de brandstof is een bepaalde fractie f_{Tr} van de totale massa van het vliegtuig. Aldus

$$\text{Afstand} = \frac{\text{Energie} \times \varepsilon}{\text{Kracht}} = \frac{C m \varepsilon f_{\text{Tr}}}{(c_w f_A)^{1/2} (m g)} = \frac{\varepsilon f_{\text{Tr}}}{(c_w f_A)^{1/2}} \frac{C}{g}. \quad (\text{C.32})$$

Een eenvoudiger voorspelling is nauwelijks denkbaar: Het bereik van een vogel of vliegtuig is het product van een dimensieloze factor $\left(\frac{\varepsilon f_{\text{Tr}}}{(c_w f_A)^{1/2}} \right)$, die rekening houdt

met de efficiëntie van de motor, de weerstand en de geometrie van de vogel, en een fundamentele lengte

$$\frac{C}{g},$$

wat een eigenschap is van het drijfgas en de zwaartekracht, en niets anders. Geen grootte van de vogel, geen massa van de vogel, geen lengte, geen breedte van de vogel; geen afhankelijkheid van luchtdichtheid. Wat is die magische lengte? Het maakt niet uit of de brandstof ganzenvet of kerosine is: beide zijn in wezen koolwaterstoffen $(\text{CH}_2)_n$. Kerosi-

Men kan d_{Tr} opvatten als de afstand die een stuwstof kan afleggen wanneer deze plotseling al zijn chemische energie omzet in kinetische energie en een parabolische baan zonder luchtweerstand begint te volgen. (Om precies te zijn: De afstand die hij op de ideale parabool kan bereiken is tweemaal C/g). Deze afstand is ook de verticale hoogte waarnaar de stuwstof zichzelf kan katapulteren wanneer er geen luchtweerstand is. Een ander amusant feit is dat de calorische waarde C van een drijfgas, die ik in J per kg heb gegeven, ook een snelheid in het kwadraat is (net zoals de verhouding energie/massa in Einsteins vergelijking $E=mc^2$ een snelheid in het kwadraat is, namelijk c^2). 40×10^6 J per kg is $(6000 \text{ m/s})^2$. Dus je kunt het ook zien als "vet is 6000 meter per seconde". Dus als je gewicht wilt verliezen door te joggen, zou 6.000 m/s (ongeveer 21.000 km/h) de gewenste snelheid zijn waarmee je al het vet in één ronde verliest.

ne heeft een calorische waarde van $C = 40$ MJ per kg. De bijbehorende lengte is dan

$$d_{Tr} = \frac{C}{g} = 4000 \text{ km} . \quad (\text{C.33})$$

van de vogel is de intrinsieke actieradius van de brandstof, 4000 km, maal een factor $\left(\frac{\varepsilon f_{Tr}}{(c_w f_A)^{1/2}} \right)$.

Als onze vogel een motorrendement $\varepsilon = 1/3$ en een inverse glijverhouding van $(C_w f_A)^{1/2} \approx 1/20$ heeft en iets minder dan de helft van de vogel uit brandstof bestaat (een volgeladen 747 bestaat voor ongeveer 46% uit brandstof), vinden we voor alle vogels en vliegtuigen, ongeacht hun grootte, hetzelfde bereik: ongeveer driemaal het intrinsieke bereik van de brandstof - ruwweg 13.000 km.

De modeluitspraken liggen weer dicht bij de werkelijkheid: het langeafstandsrecord voor een 747 (gevestigd op 23-24 maart 1989) bedraagt 16.560 km.

En de bewering dat de actieradius onafhankelijk is van de vogelgrootte wordt ondersteund door de waarneming dat vogels van alle grootten, van reusachtige grauwe ganzen tot piepkleine Noordse sterns, intercontinentale migraties maken. De langste non-stop vlucht die door een vogel werd waargenomen was 11.000 km, gevlogen door een bar-staart grutto.

[297] Hoe ver is Steve Fossett gekomen in zijn speciaal ontworpen Scaled Composites Model 311 Virgin Atlantic GlobalFlyer? 41.467 km. Een ongewoon vliegtuig: 83% van zijn startgewicht was brandstof; tijdens het vliegen maakte hij handig gebruik van de straalstroom om zijn bereik te vergroten. Het uiterst fragiele toestel had enkele problemen tijdens de vlucht.

Een ander interessant punt dat ons model aan het licht bracht: als we vragen wat de optimale luchtdichtheid is om in te vliegen, vinden we dat de vereiste stuwkracht (C.20) bij de optimale snelheid onafhankelijk is van de dichtheid. Het vliegtuig van ons model zou dus even gelukkig zijn op elke hoogte, er is geen optimale luchtdichtheid, het vliegtuig zou dezelfde afstand per liter brandstof kunnen afleggen bij elke dichtheid. Maar de optimale snelheid hangt af van de dichtheid ($v^2 \sim 1/\rho$, vergelijking (C.16)). Als al het andere gelijk blijft, zou ons vliegtuig de kortste vliegtijd hebben als het in de dunst mogelijke luchtlaag vloog. De efficiëntie van echte stuwstoffen is niet geheel onafhankelijk van snelheid en luchtdichtheid. Volgens ons model neemt de optimale snelheid ($v^2 \sim mg/\rho (c_w A_F A_S)^{1/2}$) af als een vliegtuig lichter wordt omdat het geleidelijk brandstof verbrandt. Een vliegtuig dat in lucht met constante dichtheid vliegt, moet dus iets langzamer gaan vliegen naarmate het lichter wordt. Maar een vliegtuig kan op zijn optimale snelheid blijven, zelfs bij constante snelheid, als het hoogte wint en dus de luchtdichtheid afneemt. Kijk de

volgende keer dat u vliegt of de piloot de hoogte tijdens de vlucht verhoogt, bijvoorbeeld van 31.000 voet tot 39.000 voet tegen het einde van de reis.

Wat zou de efficiëntie zijn van een waterstofvliegtuig?

We hebben al gezien dat de efficiëntie van vliegen, als energie per t-km, gewoon een dimensieloze constante maal g is. Het veranderen van het soort brandstof verandert niets aan dit argument. Vliegtuigen die op waterstof vliegen zijn interessant als we hopen ze te kunnen gebruiken om de klimaatschadelijke emissies te verminderen. Zij kunnen ook een hoger bereik bereiken. Maar verwacht niet dat ze veel energie-efficiënter zijn.

Mogelijkheden tot verbetering van de efficiëntie van vliegtuigen

Formatievliegen met ganzen zou ongeveer 10% meer brandstof kunnen opleveren (omdat de glijverhouding van de formatie hoger is dan die van een enkel vliegtuig), maar deze truc is natuurlijk sterk afhankelijk van de vraag of de ganzen allemaal op hetzelfde moment naar dezelfde plaats willen trekken.

Optimalisatie van de lengte van de tussenlandingen: Langeafstandsvliegtuigen (ontworpen voor routes van meer dan ongeveer 15.000 km) zijn niet zo zuinig met brandstof als kortefstandsvliegtuigen omdat zij meer brandstof moeten vervoeren en dus minder ruimte hebben voor vracht en passagiers. Het zou efficiënter zijn om kleinere trajecten te vliegen in kortefstandsvliegtuigen. Het optimum is voor trajecten van ongeveer 5000 km, zodat typische langeafstandsvluchten twee tussenlandingen moeten hebben om bij te tanken (Green, 2006). Tussenlandingen zouden langeafstandsvluchten ongeveer 15% efficiënter kunnen maken, maar ze zouden natuurlijk ook extra energiekosten met zich meebrengen.

[298]

Eco-vliegtuigen

Af en toe horen we van mensen die milieuvriendelijke vliegtuigen bouwen. Eerder in dit hoofdstuk hebben we echter opgemerkt dat de transportkosten van een vliegtuig in de buurt zouden liggen van

$$0,4 \text{ kWh/t-km}$$

Volgens ons model zijn de enige manieren om dit cijfer te verbeteren het verminderen van de luchtweerstand (misschien door een nieuw uitgevonden stofzuiger-met-een-vleugel-truc) of het veranderen van de vliegtuiggeometrie (in de richting van een zweefvliegtuig, met extreem brede vleugels ten opzichte van de romp, of misschien als een "vliegende vleugel" zonder enige romp).

Laten we eens kijken naar het laatste persbericht over milieuvriendelijke vliegtui-

gen en zien of een van deze nieuwe toestellen de grens van 0,4 kWh/t-km kan doorbreken. Als een vliegtuig aanzienlijk minder dan 0,4 kWh/t-km verbruikt, kunnen we concluderen dat ons model niet deugt.

De Elektra, een eenzitter van hout en glasvezel, vloog 50 km rond de zuidelijke Alpen in 48 minuten [6r32hf]. De Elektra heeft een spanwijdte van 9 m en een elektromotor van 18 kW met lithium-polymeerbatterijen van 48 kg. Het startgewicht van dit vliegtuig is 265 kg (134 kg vliegtuig, 47 kg batterij en 84 kg menselijke lading). Het vloog 50 km op 3 december 2007. Als we aannemen dat de energiedichtheid van de batterij 130 Wh/kg is en de vlucht 90% van de volledige lading heeft verbruikt (5,5 kWh), vinden we voor de transportkosten

0,4 kWh/t-km,

wat precies hetzelfde is als onze modelberekening. De Elektra is geen energiezuinig vliegtuig, vergeleken met een normaal kerosinezweefvliegtuig. Dit betekent natuurlijk niet dat elektrische vliegtuigen oninteressant zijn. Als je traditionele vliegtuigen kunt vervangen door alternatieven die evenveel energie verbruiken maar geen koolstof uitstoten, is het zeker een nuttige technologie. En als persoonlijk vervoermiddel levert de Electra een respectabele 11 kWh per 100 p-km, vergelijkbaar met onze elektrische auto van pagina 144. Maar in dit boek is de laatste regel altijd: "Waar komt die energie vandaan?"



Fig.C.12: De Elektra F-WMDJ: 11 kWh per 100 p-km. Foto door Jean-Bernard Gache. www-a-pame.eu



Fig.C.13: Draagvleugelboot. Fotografie door Georgios Pazios

Veel boten zijn ook vogels

Enige tijd nadat ik dit vluchtmodel had opgeschreven, realiseerde ik me dat het niet alleen van toepassing is op vogels in de lucht - het is ook van toepassing op draagvleugelboten en andere snelle boten - die zich allemaal hoger in het water bevinden wanneer ze in beweging zijn. –

[299]

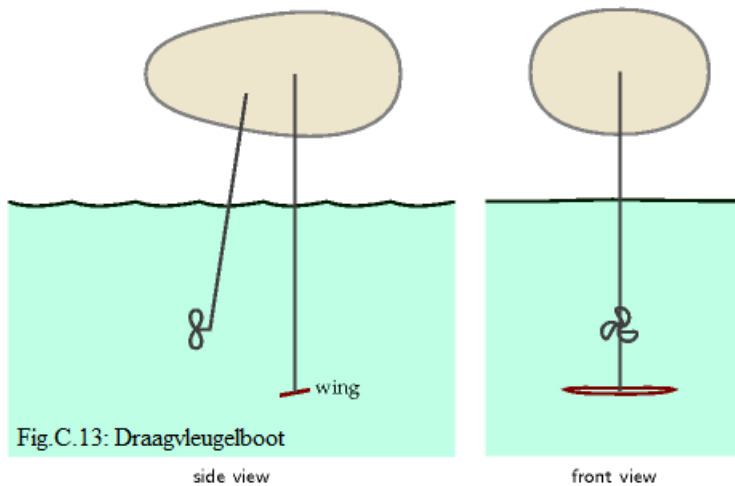


Fig. C.13: Draagvleugelboot

Fig.C.13 toont het eenvoudige principe van draagvleugels. Het gewicht van de boot wordt gedragen door een schuine vleugel onder water, die vrij klein is in vergelijking met de boot. De vleugel wekt lift op door het indrukken van water, net als het vliegtuig in Fig.C.2. Als we aan nemen dat de totale weerstand (lucht en water) wordt gedomineerd door de waterweerstand op de vleugel, en dat de afmetingen van de vleugel en de kruissnelheid zijn geoptimaliseerd voor een minimaal energieverbruik per afstand, krijgen we de

best mogelijke transportkosten, in energie per t-km, precies volgens vergelijking (C.26):

$$\frac{(c_w f_A)^{1/2}}{\epsilon} g, \quad (\text{C.34})$$

waarin c_w de weerstandscoefficiënt van de onderwatervleugel is en f_A weer de bovengenoemde dimensieloze constante, ϵ het motorrendement en g de versnelling ten gevolge van de zwaartekracht.

Misschien zijn c_w en f_A niet helemaal hetzelfde als voor een geoptimaliseerd vliegtuig. Maar een opmerkelijke eigenschap van de theorie is dat zij onafhankelijk is van de dichtheid van de vloeistof waarin de vleugel vliegt. Daarom zou de voorspelde orde van grootte voor de transportkosten (energie per afstand en gewicht, inclusief voertuiggewicht) van een draagvleugelboot dezelfde zijn als voor een vliegtuig, 0,4 kWh/t-km.

Voor toestellen die het wateroppervlak raken, zoals snelle catamarans of waterski's, zou een nauwkeuriger model ook rekening moeten houden met de energie die gaat zitten in het produceren van rimpelingen op het water, maar ik ben geneigd te geloven dat deze draagvleugeltheorie al ruwweg juist is.

Ik heb geen gegevens kunnen vinden over de kosten van het vervoer per draagvleugelboot, maar de beschikbare gegevens voor een catamaran voor personenvervoer met 41 km/uur lijken vrij goed te passen in de theorie: Hij heeft ongeveer 1 kWh per t-km nodig.

[300] Het was voor mij een verrassing te vernemen dat een eilandhopper die per vliegtuig van eiland naar eiland springt, niet alleen sneller is dan iemand die per boot reist - maar zeer waarschijnlijk ook minder energie verbruikt.

Andere manieren om aan de top te blijven

Luchtschepen

In dit hoofdstuk hebben we vastgesteld dat je vliegtuigen niet efficiënter kunt maken door langzamer te vliegen, aangezien het voordeel van een lagere luchtweerstand teniet wordt gedaan door het feit dat je de lucht dan harder naar beneden moet duwen. Kan dit probleem worden opgelost door een verandering van strategie: geen lucht naar beneden duwen, maar lichter zijn dan lucht? Een luchtschip, of het nu een zeppelin of een blimp is, gebruikt een enorm grote met helium gevulde ballon die lichter is dan lucht om het gewicht van een kleine preekstoel te compenseren. Het nadeel van deze strategie is dat de enorme ballon de luchtweerstand van het toestel behoorlijk verhoogt. De energiekosten van een luchtschip (per gewicht, per afstand) kunnen laag worden gehouden door langzaam te bewegen, een visvorm te kiezen, en zeer groot en lang te zijn. Laten we een model maken voor het energieverbruik van een geïdealiseerd luchtschip.



Fig.C.14: De 239 m lange USS Akron (ZRS-4) boven Manhattan. Ze weegt 100 ton en kan een lading van 83 ton vervoeren. Totaal motorvermogen is 3,4 MW, ze vervoert 89 bemanningsleden met wapens bij 93 mph. Ze werd ook gebruikt als vliegdekschip.

Ik ga ervan uit dat de ballon ellipsvormig is, met een doorsnede A en een lengte L . Het volume is $AL/3$. Als het luchtschip stabiel in lucht met dichtheid ρ zweeft, moet de totale massa van het luchtschip, inclusief lading en helium $m_{ges} = \rho V$ zijn. Als hij beweegt met snelheid v , heeft de luchtweerstand de kracht

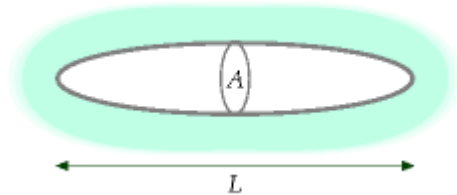


Fig.C.15: Een ellipsvormig luchtschip

$$F = \frac{1}{2} c_w A \rho v^2, \quad (\text{C.35})$$

waarbij wij aannemen dat de weerstandscoefficiënt c_w 0,03 bedraagt, gebaseerd op waarden voor vliegtuigen. De energie die per afstandseenheid moet worden verbruikt, is gelijk aan F gedeeld door het rendement ϵ van het aandrijfsysteem. De bruto transportkosten - de energie per eenheid van afstand en massa - zijn

$$\frac{F}{\epsilon m_{ges}} = \frac{\frac{1}{2} c_w A \rho v^2}{\epsilon \rho \frac{1}{3} AL} \quad (\text{C.36})$$

$$= \frac{3}{4\epsilon} c_w \frac{v^2}{L} \quad (\text{C.37})$$

Dit is een heel mooi resultaat! De bruto transportkosten van dit geïdealiseerde luchtschip hangen alleen af van zijn snelheid v en lengte L , niet van de luchtdichtheid ρ of de frontoppervlak A .

Dit model is zonder wijziging ook toepasbaar op onderzeeboten. De bruto transportkosten (in kWh per t-km) van een luchtschip zijn identiek aan die van een onderzeeër met dezelfde lengte en snelheid. De onderzeeër zal 1000 keer meer massa bevatten omdat water 1000 keer dichter is dan lucht, en het kost 1000 keer meer om het te verplaatsen. Het enige verschil tussen de twee zal reclame-inkomsten zijn.

Laten we er wat getallen bij zetten. Stel dat we willen reizen met een snelheid van 80 km/u (een Atlantische oversteek duurt dus drie dagen). In SI-eenheden is dat 22 m/s. Laten we uitgaan van een motorrendement van $\varepsilon = 1/4$. Om de laagste transportkosten te krijgen, moeten we ons afvragen wat de langst mogelijke lengte zou zijn voor zo'n Zeppelin. De Hindenburg was 245 m lang. Als we zeggen $L = 400$ m, krijgen we ,

$$\frac{F}{\varepsilon m_{\text{ges}}} = 3 \times 0,03 \frac{(22 \text{ m/s})^2}{400 \text{ m}} = 0,1 \text{ m/s}^2 = \mathbf{0,03 \text{ kWh/t-km.}}$$

Als de nuttige lading de helft van de massa van het luchtschip bedraagt, bedragen de nettotransportkosten van dit monsterluchtschip 0,06 kWh/t-km - vergelijkbaar met het spoor.

Ekranoplan

Een ekranoplan, of vaartuig met grondeffect, is een gevleugelde boot: een vliegtuig dat zeer dicht bij het wateroppervlak vliegt en zijn lift niet krijgt van het omlaag duwen van lucht zoals een vliegtuig, noch van het omlaag duwen van water zoals een draagvleugelboot, maar glijdt op een kussen van samengeperste lucht dat is opgesloten tussen de vleugels en het nabije wateroppervlak. Dit grondeffect kan worden nagebootst door een speelkaart over een vlakke tafel te schuiven. Om het luchtkussen in stand te houden is zeer weinig energie nodig, zodat een grondeffectvoertuig zich bijna gedraagt als een normaal voertuig zonder rolweerstand. Het grootste deel van de energie wordt verbruikt door luchtwrijving. Bedenk dat in een normaal vliegtuig de helft van de energie gebruikt wordt tegen luchtwrijving, de andere helft voor lift. De Sovjet-Unie ont-



Fig.C.16: De Lun Ekranoplan - iets langer en zwaarder dan een Boeing 747. Foto's: A. Belyaev.

wikkelde de Ekranoplan als een militair transport- en raketvliegtuig in het Chroesjtsjov tijdperk. De Lun Ekranoplan haalde een snelheid van 500 km/u, en de totale stuwkracht van zijn acht motoren bedroeg 1000 kN, hoewel deze stuwkracht niet nodig was toen het voertuig eenmaal uit het water kwam. Aangenomen dat de stuwkracht tijdens de reis een kwart van het maximum was, de stuwraketten 30% efficiënt waren, en van het totale gewicht van 400 ton, 100 ton vracht was, zouden de netto transportkosten 2 kWh per t-km bedragen. Ik stel me voor dat als de Ekranoplan geoptimaliseerd zou zijn voor civiel vrachtvervoer, hij ongeveer de helft van de vrachtkosten van een conventioneel vliegtuig zou hebben.

Mythen en legenden

Het vliegtuig zou toch gevlogen hebben, dus mijn vlucht was energieneutraal.

Dit is om twee redenen onjuist: ten eerste heeft uw extra gewicht extra energie nodig om u overeind te houden. Ten tweede reageren luchtvaartmaatschappijen op de vraag en vliegen zij met meerdere vliegtuigen wanneer dat nodig is.

[302] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[297]	Echte straalmotoren hebben een rendement van ongeveer $\varepsilon = 1/3$, – Echte straalmotoren hebben een rendement van ongeveer $\varepsilon = 1/3$. Typische motorrendementen liggen in het bereik van 23%-36% [adg. stanford-edu/aa241/propulsion/sfc.html]. Voor het typische vliegtuig ligt de totale efficiëntie tussen 20% en 40%, waarbij de beste bypass stuwraketten 30-37% leveren in glijvlucht [www-grida.no/climate/ipcc/aviation / 097.htm]. Maar je kunt niet zomaar de meest efficiënte motor kiezen omdat die misschien zwaarder is (ik bedoel, een grotere massa per stuwkrachteenheid heeft) en dus de algemene efficiëntie van het vliegtuig vermindert.
[292]	Boeing 747 – 272 Boeing 747. Weerstandscoefficiënt van de 747 van www-aerospace-web.org. Resterende 747 gegevens van [2af5gw]. Albatros gegevens van [32judd].
[297]	De langst gemeten non-stop vlucht van een vogel 277 De langst gemeten non-stop vlucht van een vogel New Scientist 2492. "Grutto is koning van het luchtruim" 26 maart 2005. 11 september 2007: "Watersnip vliegt 11.500 km non-stop van Alaska naar Nieuw-Zeeland". [2qbquv]
[297]	Het optimum is voor trajecten van ongeveer 5000 km lengte – 278 Optimalisering van de hoptengte: de "sweet spot" is wanneer de hop ongeveer 5000 km lang is. Quelle: Green (2006).
[299]	Gegevens voor een catamaran 280Data voor een catamaran voor passagiersvervoer. Van [5h6xph]: Verplaatsing (vol beladen) 26,3 ton. Op een reis van 1050 zeemijl verbruikte zij 4780 liter brandstof. Hieruit bereken ik een vrachtvervoerskost van 0,93 kWh per t-km. Hier, tussen haakjes, neem ik het totale gewicht van het schip. De efficiëntie van het passagiersvervoer van hetzelfde schip bedraagt ongeveer 35 kWh per 100 p-km.
[301]	Het Lun Ekranoplan – 281 Het Lun ekranoplan. Bronnen: www-fas.org [4p3yco], (Taylor, 2002a).
	Verder lezen: Tennekes (1997), Shyy et al. (1999).

D zonne-energie-II

Bijlage D: zonne-energie II

Op bladzijde [047] hadden wij vier opties voor biomassa op zonne-energie opgesomd:

1. steenkoolvervanging
2. vervanging van olie
3. voedsel voor mensen en andere dieren
4. verbranding van bijproducten van de landbouw.



Fig.D.1: *Twee bomen*



Fig.D.2: *Verkrachting. Als je er biodiesel van maakt, is het vermogen per landoppervlakte 0,13 W/m². Foto door Tim Dunne*

Wij zullen de maximale plausibele bijdrage voor elk van deze processen schatten. In de praktijk wordt bij veel van deze methoden zoveel energie in het proces verbruikt, dat deze processen moeilijk een nettobijdrage kunnen leveren (fig.6.14). Maar in de volgende beschouwingen zal ik dergelijke kosten van interne energie verwaarlozen.

Energiegewassen als steenkoolvervangers

Als we in Engeland energiegewassen planten zoals wilg, miscanthus of populier (die een gemiddelde energiedichtheid hebben van 0,5 W per vierkante meter land) en deze vervolgens in een 40% efficiënte warmtekrachtcentrale duwen, is het haalbare vermogen per landoppervlakte 0,2 W/m². Indien een achtste van Engeland met deze installaties zou worden bedekt (500 m² per persoon), zou de totale haalbare output 2,5 kWh/d per persoon bedragen.

Vervanging van aardolie

Er zijn een paar manieren om planten in vloeibare brandstof om te zetten. Voor elke methode druk ik het potentieel uit in termen van vermogen per oppervlakte-eenheid (zoals in **fig.6.11**).

Engeland's belangrijkste bron van biodiesel, koolzaad

Koolzaad wordt in Engeland gewoonlijk in september gezaaid en in augustus geoogst. Momenteel wordt in Engeland jaarlijks op 450.000 ha akkerland koolzaad verbouwd (dit is ongeveer 2% van Engeland). Koolzaadvelden produceren 1200 liter biodiesel per hectare per jaar; biodiesel heeft een energie van 9,8 kWh/l; dat is dus een energie per oppervlakte van 0,13 W/m².

Als we 25% van het landoppervlak van Engeland zouden gebruiken voor het verbouwen van koolzaad, zouden we biodiesel kunnen produceren met een snelheid van 3,1 kWh/d per persoon.

[304] *Ethanol uit suikerbieten*

De suikerbietenteelt in Engeland levert een indrukwekkende 53 ton per ha per jaar op. Uit 1 ton suikerbieten kan 108 liter bio-ethanol worden geproduceerd. Bio-ethanol heeft een energie-inhoud van 6 kWh per liter, zodat met dit proces een vermogen per landoppervlakte van 0,4 W/m² wordt bereikt, de noodzakelijke energie-input niet meegerekend.

Bio-ethanol uit suikerriet

Waar suikerriet kan worden geteeld (b.v. in Brazilië), bedraagt de opbrengst 80 ton per hectare per jaar, wat 17.600 liter ethanol oplevert. Bij 6 kWh per liter (de energie-inhoud van ethanol) bereikt dit proces een vermogen per landoppervlakte van 1,2 W/m².

Bio-ethanol uit graan in de VS

De productie per landoppervlakte van bio-ethanol uit graan is verbijsterend laag. Laat me voor de lol de nummers eerst in archaïsche eenheden uitdrukken. 1 acre produceert 122 bushels (1 USBushel is gelijk aan 8 US gallons) graan per jaar, wat 122 x 2,6 US gallons ethanol oplevert, wat bij een energie-inhoud van 84.000 BTU per gallon neerkomt op een vermogen per landoppervlakte van 0,2 W/m²; de energie-input die nodig is om het graan in ethanol om te zetten is 83.000 BTU per gallon, dus 99% van de energie wordt door het proces zelf verbruikt, zodat een nettovermogen per landoppervlakte van 0,002 W/m² overblijft. Als men veel energie wil halen uit het graan/ethanol-proces, moet men ook alle bijproducten exploiteren. Met inbegrip van de energie in de bijproducten bedraagt het nettovermogen per landoppervlakte ongeveer 0,05 W/m².

Cellulose-ethanol uit switchgrass

Cellulose-ethanol - de wonderbaarlijke "volgende generatie" biobrandstoffen? Schmer at al. (2008) ontdekten dat de netto-energie van vijf jaar switchgras op grond van slechte kwaliteit in 10 Amerikaanse kaders ei 60 GJ per hectare per jaar bedroeg, of 0,2 W/m². "Deze basisstudie weerspiegelt het genetisch materiaal en de landbouwtechnologie van 2000 en 2001, toen het zaaien plaatsvond. Vooruitgang op het gebied van genetica en landbouwtechnologie zou de energieduurzaamheid en de opbrengst aan biobrandstoffen van switchgras verder kunnen verbeteren."

Jatropha heeft ook een lage vermogensdichtheid per landoppervlakte

Jatropha is een oliehoudend gewas dat het best groeit in droge tropische gebieden (300-1000 mm regen per jaar). Hij houdt van temperaturen tussen 20 en 28 °C. De verwachte opbrengst in warme landen op goede grond is 1600 L biodiesel per ha per jaar. Per landoppervlakte is dit 0,18 W/m². Op braakland bedraagt de opbrengst 583 L/ha per jaar, wat overeenkomt met 0,065 W/m².

[305] Als de mensen besluiten 10% van Afrika te gebruiken om deze 0,065 W/m² op te wekken, en je verspreidt deze energie over 6 miljard mensen wereldwijd, hoeveel zou dat dan opleveren voor ieder van ons? 0,8 kWh/d/p. Ter vergelijking: het wereldwijde olieverbruik bedraagt 80 miljoen vaten per dag, wat neerkomt op 23 kWh/d/p verspreid over 6 miljard mensen. Dus als zelfs heel Afrika met Jatropha-plantages bedekt zou zijn, zou de energie die op deze manier wordt opgewekt slechts een derde van het olieverbruik in de wereld bedragen.

Tabel D.3: Calorische waarden van hout en soortgelijke artikelen. Bronnen: Yaros (1997); Ucuncu (1993), *Digest of UK Energy Statistics 2005*.

	Energiedichtheid (kWh/kg)
Naaldhout	
- luchtgedroogd	4,4
- kunstmatig gedroogd	5,5
Hardhout	
- luchtgedroogd	3,75
- kunstmatig gedroogd	5,0
Schrijfpapier	4,0
Glanzend papier	4,1
Krantenpapier	4,9
Karton	4,5
Steenkool	8
Stro	4,2
Kippenmest	2,4
Algemeen industrieel afval	4,4
Medisch afval	3,9
Huishoudelijk afval	2,6
Verwerkt afval	5,1
Banden	8,9

Hoe zit het met algen?

Algen zijn ook planten, dus alles wat hierboven is gezegd, geldt ook voor hen. Slijmerige onderwaterplanten zijn niet efficiënter in fotosynthese dan hun neven op het land. Maar

is een truc die ik niet heb vermeld en die gebruikelijk is bij algen voor biodiesel:



kweek de algen in water dat sterk verrijkt is met kooldioxide, dat kan worden opgevangen uit de uitlaatgassen van elektriciteitscentrales of andere industrieën. Planten doen veel gemakkelijker aan fotosynthese als de CO₂ al voor hen geconcentreerd is. Ron Putt van de Auburn University zegt dat algen op zonnige plaatsen in Amerika, in bassins waar tot 10% geconcentreerde CO₂ wordt ingebracht, een groeisnelheid kunnen bereiken van 30 g per vierkante meter per dag, waarbij 0,01 liter biodiesel per vierkante meter per dag wordt geproduceerd. Dit komt overeen met een vermogensdichtheid per bekkenoppervlak van 4 W/m² - vergelijkbaar met die van een Beierse PV-installatie voor open ruimte. Dus als je 50 km per dag wilt rijden met een doorsneeauto (12 km per liter), heb je 420 vierkante meter algenbassin nodig om de auto van energie te voorzien. Ter vergelijking: de oppervlakte per persoon in Engeland is 4000 vierkante meter, waarvan 69 vierkante meter water is. Maar vergeet niet dat het van essentieel belang is deze tanks te voeden met geconcentreerde CO₂. Dus deze techniek is beperkt tot landgebieden - hoeveel van Engeland kunnen we veranderen in algenpoelen? - en afhankelijk van de beschikbaarheid van geconcentreerd CO₂, waarvan de afvang energiekosten met zich meebrengt (een kwestie die wij in de [hoofdstukken 23 en 31](#) hebben besproken). Laten we de door de beschikbaarheid van CO₂ opgelegde beperking nader bekijken. Om algen te laten groeien met 30 g per vierkante meter per dag, heb je minstens 60 g CO₂ per vierkante meter per dag nodig (omdat de CO₂-molecule meer massa per koolstofatoom heeft dan de moleculen in de algen). Als alle CO₂ van alle Engelse WKK-centrales zou worden afgevangen (ongeveer 2½ ton per jaar per persoon), zou dat 230 vierkante meter algenplas per persoon opleveren - ongeveer 6% van het totale landoppervlak. Dit gebied zou een biodiesel leveren die overeenkomt met 24 kWh/d per persoon, als we ervan uitgaan dat de cijfers uit het zonnige Amerika ook hier gelden. Een aannemelijk visioen? Misschien op een tiende van die schaal? Ik laat het aan jou over om te beslissen.

Hoe zit het met algen in de oceaan?

Denk eraan, het algen-naar-biodiesel verhaal voedt de algen altijd met geconcentreerd CO₂. Als we ermee in zee gaan, zal dit CO₂ pompen waarschijnlijk niet mogelijk zijn. En zonder de geconcentreerde CO₂, daalt de algen productiviteit tot een honderdste. Om een significante bijdrage te kunnen leveren met algen in de oceaan, zouden algenkwekerijen landoppervlakte moeten hebben.

Hoe zit het met algen die waterstof produceren?

De aanpak om algenslijm in zonlicht waterstof te laten produceren is een slim idee omdat hierbij veel stappen worden overgeslagen die normaal gesproken nodig zijn voor koolhydraatproducerende planten. Elke chemische stap vermindert de efficiëntie een beetje. Waterstof kan in één stap rechtstreeks door een fotosynthetisch systeem worden geproduceerd. In een studie van het National Renewable Energy Laboratory in Colorado wordt beweerd dat een reactor gevuld met genetisch gemodi-

ficeerde groene algen, [306] die 11 ha van de woestijn van Arizona in beslag neemt, 300 kg waterstof per dag zou kunnen produceren. Waterstof bevat 39 kWh per kg, dus deze waterstoffabriek op algen levert 4,4 W/m² vermogen per reactoroppervlak. Na aftrek van de elektriciteit die nodig is om de installatie te laten draaien, blijft een netto-opbrengst over van 3,6 W/m². Voor mij is dit een veelbelovend huisnummer - vergeleken met bijvoorbeeld Beierse PV-parken (5 W/m²).

Voedsel voor mensen en andere dieren

Voedsel voor mens en dier Granen zoals tarwe, haver, gerst en maïs hebben een energiedichtheid van ongeveer 4 kWh per kg. In Engeland is een tarweopbrengst van 7,7 ton/ha gebruikelijk. Als de tarwe door dieren wordt gegeten, heeft dit proces een vermogen per landoppervlakte van 0,34 W/m². Indien in Engeland 2800 m² per persoon (het totale landbouwareaal) voor dergelijke gewassen wordt gebruikt, levert dit een chemische energie van 24 kWh/d per persoon op.

Verbranding van bijproducten van de landbouw

Wij hebben zojuist berekend dat het vermogen per oppervlakte-eenheid van een biomassacentrale die de best mogelijke energiegewassen verbrandt, 0,2 W/m² bedraagt. Als we in plaats daarvan voedselgewassen verbouwen en alleen de restjes die we niet opeten verbranden in de biomassacentrales - of als we het voedsel in kippen stoppen en alleen wat uit de achterkant van de kip komt verbranden in de biomassacentrales - hoeveel energie kunnen we dan halen uit één vierkante meter landbouwgrond? Laten we eerst een ruwe schatting maken en dan naar echte gegevens kijken. Laten we voor een wilde speculatie eens aannemen dat de bijproducten van het oogsten van de helft van het akkerland in Engeland (2000 m² per persoon) naar biomassa-WKK-installaties worden gedreven, waar ze (per akkerbouwareaal) 10% van de opbrengst van de beste energiegewassen opleveren: 0,02 W/m². Vermeignigvuldig dat met 2000 m² en we krijgen 1 kWh/d per persoon.

Was ik oneerlijk tegenover landbouwafval door deze wilde speculatie? Wij kunnen de aannemelijke energieproductie uit dit afval herberekenen door de gegevens van het prototype van een met stro gestookte WKK-centrale in Elean, Zuid-Engeland, op te schalen. De energie-output van Elean is 36 MW en het verbrandt 200.000 ton per jaar van land in zijn omgeving (straal van 50 mijl). Ervan uitgaande dat in Engeland dezelfde dichtheid kan worden bereikt, opent het Elean-model een potentieel van 0,002 W/m². Bij 4000 m² per persoon is dat 8 W per persoon, of 0,2 kWh/d per persoon.

Laten we de rekensom de andere kant op maken. De Britse stroproductie bedraagt 10 miljoen ton per jaar, 0,46 kg per dag per persoon. Met 4,2 kWh per kg heeft dit stro een chemische energie van 2 kWh/d/p. Als al het stro zou worden verbrand in WKK-centrales met een rendement van 30% - een veronderstelling die niet goed

past bij de veehouderij, waarvoor het stro elders moet worden gebruikt - zou dit een elektriciteitsproductie van 0,6 kWh/d per persoon opleveren.

Vuilnisbelt-gas

Momenteel is het grootste deel van het methaangas dat vrijkomt op stortplaatsen afkomstig van biologisch materiaal, met name voedselresten. Dus zolang we voedsel en kranten blijven weggooien, is stortgas een duurzame hulpbron - plus, vanuit het oogpunt van klimaatverandering, is het verbranden van het methaan een goed idee omdat methaan een krachtiger broeikasgas is dan CO₂. Een stortplaats die 7,5 miljoen ton huishoudelijk afval per jaar ontvangt, kan 50.000 kubieke meter methaan per uur produceren.

[307] Voor 1994 werden de emissies van stortplaatsgas geraamd op 0,05 m³ per dag per persoon, hetgeen een chemische energie van 0,5 kWh/d per persoon omvat en 0,2 kWh(el)/d per persoon aan elektriciteit zou kunnen opwekken indien het volledig in elektriciteit zou worden omgezet bij een efficiëntie van 40%. De emissies van stortplaatsgas nemen af als gevolg van wijzigingen in de regelgeving en liggen momenteel ongeveer 50% lager.

Verbranding van afval

SELCHP ("South East London Combined Heat and Power") [www-selchp.com] is een elektriciteitscentrale van 35 MW die per jaar 420 kt huishoudelijk afval uit Londen verbrandt. Het afval wordt daar in zijn geheel verbrand, zonder sortering. Na de verbranding worden de metalen gescheiden voor recycling en worden de problematische afvalslakken naar speciale stortplaatsen gebracht. De resterende as wordt gebruikt als recyclagemateriaal in de bouw en de civiele techniek. De calorische waarde van het afval is 2,5 kWh/kg en het rendement van de centrale is 21%, zodat 1 kg afval ongeveer 0,5 kWh elektriciteit oplevert. De koolstofuitstoot bedraagt ongeveer 1000 g CO₂ per kWh. Van de opgewekte 35 MW wordt ongeveer 4 MW binnen de centrale gebruikt om de machines en filtratiesystemen te laten draaien.



Fig.D.4: SELCHP – *Jouw rot-zooi is hun zaak.*

Als we dit idee opschalen en aannemen dat elk dorp zo'n installatie heeft en iedereen 1 kg afval per dag produceert, krijgen we 0,5 kWh(el) per dag per persoon uit afvalverbranding.

Dat is vergelijkbaar met de opbrengst dat we hierboven hebben geraamd voor het afvangen van methaan van stortplaatsen. En je kunt het niet van twee kanten hebben, natuurlijk. Meer afvalverbranding betekent minder methaan dat vrijkomt op stortplaatsen. Vergelijk **Fig.27.2** en **Fig.27.3** op blz. [226] voor meer gegevens over afvalverbranding.

Opmerkingen en referenties

Pagina	
[303]	Het vermogen dat met wilg, miscanthus of populier kan worden bereikt, bedraagt 0,2 W/m². – 283 Het vermogen per oppervlakte-eenheid van het gebruik van wilg, miscanthus of populier voor elektriciteit is 0,2 W/m ² . Bron: Select Committee on Science and Technology Minutes of Evidence - Memorandum van de Biotechnology & Biological Sciences Research Council [www-publications.parliament.uk/pa/ld200304/ldselect/ldscitech/126/4032413.htm]. "Doorgaans kan duurzame landbouw in Noord-Europa 10 t/ha/j droge houtbiomassa produceren.... Een gebied van 1 km ² kan dus 1000 droge t/j produceren - genoeg voor 150 kW(el) bij lage of 300 kW(el) bij hoge omzettingsefficiënties." Dit komt neer op 0,15- 0,3 W(el)/m ² . Zie ook Layzell et al. (2006), [3ap7lc].
[303]	Canola-velden produceren 1200 liter biodiesel – 283 Oliezaadraapzaad. Bronnen: Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www-defra.gov.uk.
[304]	Suikerbietenteelt in Engeland – Suikerbiet. Quelle: statistics-defra.gov.uk/esg/default.asp
[304]	Bio-ethanol uit graan – 284 . Bio-ethanol uit maïs. Quelle: Shapouri et al. (1995)
[304]	Cellulose-ethanol – Bio-ethanol uit cellulose. Zie ook Mabee et al. (2006).
[304]	Jatropha. Quellen: Francis et al. (2005), Asselbergs et al. (2006). [308]
[305]	dat op zonnige plaatsen in Amerika , in vijvers gevoed met geconcentreerde CO ₂ van 10%, algen een groeisnelheid kunnen bereiken van 30 gram per vierkante meter per dag 285In Amerika kunnen algen in vijvers gevoed met geconcentreerde CO ₂ groeien met 30 gram per vierkante meter per dag, waarbij 0,01 liter biodiesel per vierkante meter per dag wordt geproduceerd. Bron: Putt (2007). In deze berekening zijn alle energiekosten verwaarloosd die verband houden met de exploitatie van het algenbassin en de verwerking van de algen tot biodiesel. Putt beschrijft de energiebalans van een geplande algenkwekerij van 100 hectare die wordt aangedreven door methaan uit een biogasinstallatie. De beschreven boerderij zou in feite minder energie produceren dan de energie van het benodigde methaan. De boerderij van 100 hectare verbruikt 2.600 kW methaan, wat overeenkomt met een energie-input van 6,4 W/m ² . Vergeet niet dat de energie-output in de vorm van biodiesel slechts 4,2 W/m ² zou zijn. Alle voorstellen voor de productie van biobrandstoffen moeten met een kritische blik worden bekeken!
[305]	In een studie van het National Renewable Energy Laboratory in Colorado wordt beweerd dat een reactor gevuld met genetisch gemodificeerde groene algen die 11 hectare woestijn in Arizona beslaat, 300 kg waterstof per dag kan produceren. – 286 In een onderzoek van het National Renewable Energy Laboratory wordt voorspeld dat genetisch gemodificeerde groene algen, met een oppervlakte van 11 hectare, 300 kg waterstof per dag zouden kunnen produceren. Quelle: Amos (2004).
[306]	van het prototype voor een met stro gestookte warmtekrachtkoppelingcentrale in Elean – Elean-centrale. Quelle: Witboek van de regering (2003). Elean Power Station (36 MW) - de eerste met stro gestookte elektriciteitscentrale van het Verenigd Koninkrijk. Stroh-Produktion: www-biomassenergycentre.org.uk.
[306]	Deponiegas – 287 Stortgas. Quellen: Matthew Chester, City University, Londen,

	persönliche Mitteilung; Meadows (1996), Aitchison (1996); Alan Rosevear, UK Representative on Methane to Markets Landfill Gas Sub-Committee, mei 2005 [4hamks].

E verwarming-II

Bijlage E: Verwarming II

Een perfect afgesloten en geïsoleerd huis zou eeuwig warmte vasthouden en geen verwarming nodig hebben. De twee belangrijkste oorzaken van warmteverlies in gebouwen zijn

1. geleiding - warmte stroomt rechtstreeks door muren, ramen en deuren,
2. ventilatie - warme lucht sijpelt naar buiten door kieren en spleten, of opzettelijk door ventilatiekanalen.

In het standaardmodel voor warmteverlies zijn deze twee stromen evenredig met het temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenlucht. Voor een typisch Engels huis is ventilatie het grootste energieverlies, zoals we zullen zien.

Warmtegeleidingsverliezen

Het warmteverlies door een muur, plafond, vloer of raam is het product van drie factoren: de oppervlakte van de muur, een maat voor de geleidbaarheid van het materiaal, in verkoopbrochures bekend als de "U-waarde" of warmtedoorgangscoefficiënt, en het temperatuurverschil:

$$\text{Vermogensverlies} = \text{oppervlakte} \times U \times \text{temperatuurverschil} .$$

De U-waarde wordt meestal uitgedrukt in $\text{W/m}^2/\text{K}$. (Eén Kelvin (1 K) is hetzelfde als één graad Celsius (1 °C)). Grotere U-waarden betekenen een groter vermogensverlies. Hoe dikker een muur, hoe kleiner de U-waarde. Dubbele beglazing is bijna net zo goed als een massieve stenen muur. (Zie **Tabel.E.2.**)

De U-waarden van objecten die "in serie" staan, zoals een muur en de binnenpleister die er bovenop zit, kunnen op dezelfde manier worden gecombineerd als de elektrische geleidbaarheid



$$U_{\text{Serieschakeling}} = 1 / \left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \right).$$

Een praktisch voorbeeld van de toepassing van deze regel staat op blz. 315.

Keuken	2
Badkamer	2
Gang	1
Slaapkamer	0.5

Tabel.E.1: *Luchtverversingen per uur: typische waarden van N voor gesloten ruimten. De meest tochtige kamers kunnen $N=3$ luchtwisselingen per uur hebben. De vereiste minimumsnelheid is 0,5 tot 1 luchtverversing per uur om te zorgen voor voldoende frisse lucht voor de bewoners en om schade aan het gebouw door een te hoge vochtigheidsgraad te voorkomen (EST 2003).*

Ventilatieverliezen

Om de warmte te berekenen die nodig is om koude binnenkomende lucht op te warmen, hebben we de warmtecapaciteit van lucht nodig: 1,2 kJ/m³/K. Bij de beoordeling van gebouwen is het gebruikelijk om de prestatieverliezen ten gevolge van ventilatie te beschrijven als het product van het aantal luchtwisselingen N per uur met het volume V van de ruimte in kubieke meter, de warmtecapaciteit C en het temperatuurverschil ΔT tussen binnen en buiten.

	U-waarden (W/m ² /K)		
	oude Bouw	modern Standaard	beste Methode
Wanden		0,45-0,6	0,12
Bakstenen muur	2,4		
Buitenmuur: 24cm baksteen	2,2		
Spouwmuur van baksteen, ongevuld	1,0		
Bakstenen spouwmuur, geïsoleerd	0,6		
Verdiepingen		0,45	0,14
getrapte vloerplanken	0,7		
massieve betonnen vloer	0,8		
Daken		0,25	0,12
Plat dak met 25 mm isolatie	0,9		
Schuin dak met 100mm isolatie	0,3		
Windows			1,5
Enkele beglazing	5,0		
Dubbele beglazing	2,9		
Dubbele beglazing, 20 mm tussenruimte	1,7		
Driedubbele beglazing	0.7-0.9		

Tabel.E.2: *U-waarden voor wanden, vloeren, daken en ramen*

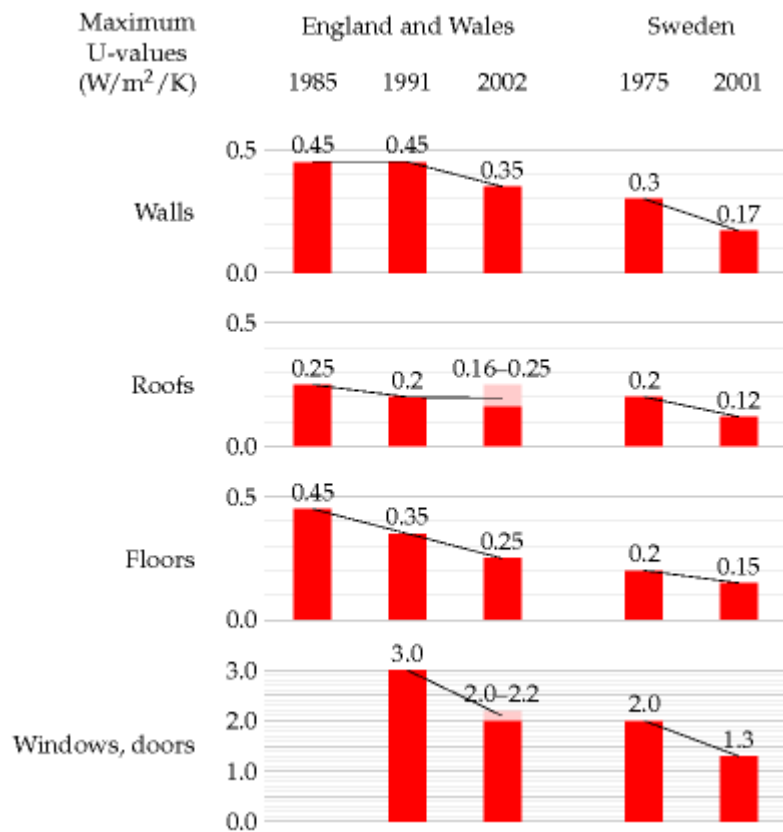


Fig.E.3: *U-waarde vereisten van Engelse en Zweedse bouwverordeningen*

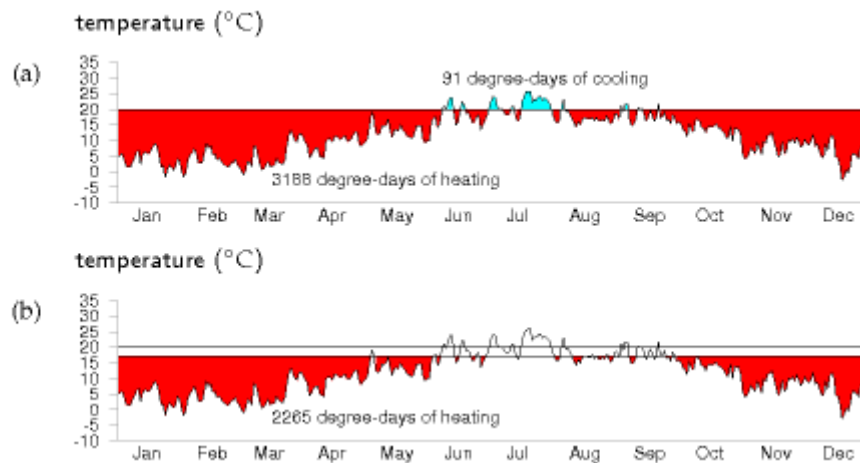


Fig.E.4: *Temperatuurbehoefte in Cambridge, 2006, gevisualiseerd als een gebied in de grafiek van de dagelijkse gemiddelden in de temperatuurcurve. a) thermostaat op 20°C , inclusief koeling in de zomer; b) thermostaat op 17°C in de winter. –*

[311]

$$\text{Leistung (Watt)} = C \frac{N}{1 \text{ h}} V(\text{m}^3) \Delta T(\text{K}) \quad (\text{E.1})$$

$$= (1,2 \text{ kJ/m}^3/\text{K}) \frac{N}{3600 \text{ s}} V(\text{m}^3) \Delta T(\text{K}) \quad (\text{E.2})$$

$$= \frac{1}{3} NV \Delta T. \quad (\text{E.3})$$

Energieverlies en vereiste temperatuur (graaddagen)

Aangezien energie immers vermogen x tijd is, kan het verlies van energie door een gebied in korte tijd worden geschreven als.

$$\text{Energieverlies} = \text{oppervlakte} \times U \times (\Delta T \times \text{tijdsperiode}),$$

en het energieverlies door ventilatie als

$$\frac{1}{3} NV \times (\Delta T \times \text{tijdsperiode}).$$

Beide energieverliezen hebben de vorm

$$\text{iets} \times (\Delta T \times \text{tijdsperiode}),$$

waarbij het "iets" wordt gemeten in watt per °C. Naarmate de dag en de seizoenen vorderen, verandert het temperatuurverschil; en wij kunnen een langere tijdspanne mentaal opdelen in vele kleine stukjes waarin de temperatuur steeds vrijwel constant is. Van de ene tijdsspanne tot de volgende, verandert de temperatuur, maar niet het "iets". Dus als we het energieverlies van een kamer (door warmtegeleiding en ventilatie) over een lange tijdspanne willen voorspellen, moeten we twee dingen vermenigvuldigen:

1. de som van alle "dingen" (alle termen oppervlakte x U voor muren, daken, vloeren, en ramen, en alle termen $\frac{1}{3} NV$ voor de volumes); en
2. de som van alle (temperatuurverschil x tijdspanne) factoren (voor alle tijdspanne-onderdelen).

De eerste factor is een eigenschap van het gebouw, gemeten in watts per °C. Ik noem het de lektheid van het gebouw. (Het lekpercentage wordt soms de *warmteverliescoëfficiënt* genoemd.) De tweede factor is een eigenschap van het weer, vaak uitgedrukt in "graaddagen", omdat het temperatuurverschil in graden wordt gemeten en dagen een handige maat zijn voor de tijdspanne. Bijvoorbeeld, als het in uw huis 18°C is en de buitentemperatuur gedurende een week 8°C, dan zeggen we dat die week $10 \times 7 = 70$ graaddagen bijdraagt aan de ($\Delta T \times$ tijdspanne) som. Ik zal de som van al deze ($\Delta T \times$ periode) factoren de temperatuurbehoefte van

een periode noemen.

$$\text{Energieverlies} = \text{leksnelheid} \times \text{vereiste temperatuur.}$$

Wij kunnen het energieverlies van ons gebouw verminderen door het lekpercentage te verlagen, of door de vereiste temperatuur te verlagen, of beide. In de volgende twee punten worden deze twee factoren nader bekeken aan de hand van een case-studie van een huis in Cambridge.

Er is nog een derde factor die we moeten bespreken. De verloren energie wordt weer vervangen door het verwarmingssysteem van het gebouw, en door andere warmtebronnen zoals de bewoners, hun elektrische en kooktoestellen, en de zon. [312] Als we kijken naar het verwarmingssysteem, is de *geleverde* energie niet identiek aan de energie die door het gebouw wordt verbruikt. Zij zijn met elkaar verbonden door het thermisch rendement van het verwarmingssysteem (de zogenaamde prestatiecoëfficiënt).

$$\text{Verbruikte energie} = \text{geleverde energie} / \text{prestatiecoëfficiënt.}$$

Voor een condensatieketel – HR-ketel – op gas bijvoorbeeld bedraagt de prestatiecoëfficiënt 90% omdat 10% van de energie verloren gaat via de schoorsteen.

Samenvattend kunnen we het energieverbruik van een gebouw dus op drie manieren verminderen:

1. door de vereiste temperatuur te verlagen,
2. door het lekken te verminderen...
3. door de prestatiecoëfficiënt te verhogen.

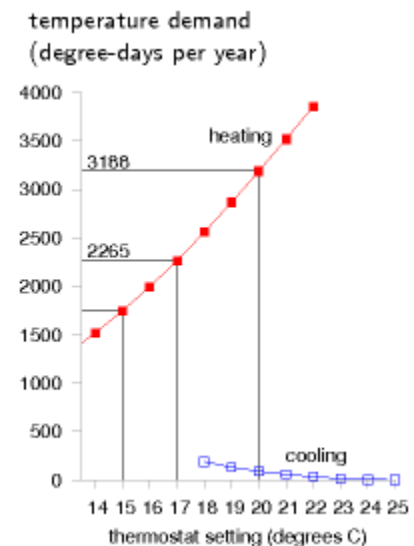
Wij willen nu de potentiële besparingen van deze drie opties bepalen. (Een vierde optie - verhoging van de extra energiewinsten van het gebouw, met name door zonnestraling - zou ook nuttig kunnen zijn, maar die zal ik hier niet behandelen).

Vereiste temperatuur

We kunnen de temperatuurvereiste (zie blz. [311] hierboven voor de definitie) mooi visualiseren in een grafiek van het buitentemperatuurverloop in de tijd (**Fig.E.4**). Voor een gebouw waarvan de binnentemperatuur op 20°C wordt gehouden, ligt de totale temperatuurbehoefte tussen de horizontale lijn bij 20°C en de temperatuurcurve.

In **Fig.E.4** (a), voor een jaar in Cambridge, zien we dat de vereiste temperatuur 3.188 graaddagen verwarming en 91 graaddagen koeling bedraagt. Deze cijfers maken het ons gemakkelijk het effect te zien van het lager zetten van de thermostaat of het leven zonder airconditioning. Door de thermostaat in de winter op 17°C te zetten, daalt de behoefte aan verwarming van 3.188 graaddagen tot 2.265 graaddagen (**Fig.E.4** (b)), wat een vermindering van 30% van de verwarmingskosten betekent. [313] Door de thermostaat op 15°C te zetten, daalt de behoefte van 3.188 tot 1748 graaddagen, een besparing van 45%.

Fig.E.5: *Temperatuurbehoefte (zie tekst blz. 311 voor definitie) in Cambridge, in graaddagen per jaar, als functie van de instelling van de thermostaat (°C). Door de thermostaat in de winter lager te zetten, van 20°C naar 17°C, daalt de behoefte aan verwarming met 30%, van 3.188 naar 2.265 graaddagen. Door de thermostaat in de zomer van 20°C naar 23°C te draaien, daalt de behoefte aan koeling met 82%, van 91 naar 16 graaddagen.*



Deze berekeningen geven ons een orde van grootte van de besparingen die mogelijk zijn door de thermostaat lager te zetten, maar zij leveren alleen nauwkeurige voorspellingen op als wij rekening houden met twee details: Ten eerste absorberen gebouwen inherent energie van de zon, zodat de binnentemperatuur hoger is dan de buitentemperatuur, zelfs zonder verwarming; en ten tweede stralen de bewoners en hun toestellen warmte uit, waardoor de behoefte aan verwarming kleiner is dan in theorie. De vereiste temperatuur van geperst in graad-dagen is ook een nogal onhandelbaar iets. Waarden als "3500 graad-dagen" zijn moeilijk te onthouden. (En academici vinden de eenheid misschien verwarrend omdat zij herinnert aan de dagen dat zij verkleed met doctoraalhoeden rondliepen om hun graden te vieren). We kunnen deze hoeveelheid nog duidelijker maken door ze te delen door 365, het aantal dagen in een jaar, en zo de vereiste temperatuur te verkrijgen in "graaddagen per dag" of zo u wilt gewoon in "graden". **Fig.E.6.** toont de herschaalde grafiek. Uitgedrukt op deze manier is de vereiste temperatuur gewoon het gemiddelde temperatuurverschil tussen binnen en buiten. De gemarkeerde waarden zijn 8,7°C voor een thermostaatstand van 20°C, 6,2°C voor een

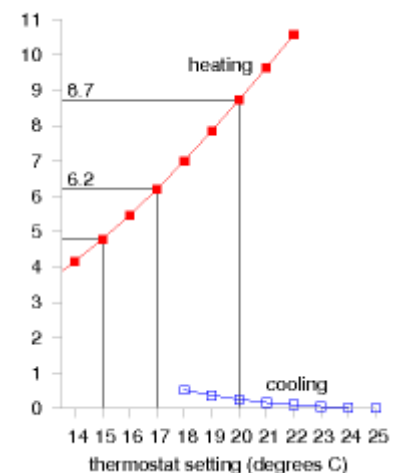


Fig.E.6: *De temperatuurbehoefte in Cambridge, herschaald in graaddagen per dag, ook bekend als graden. In deze eenheden is de eis enkel het verschil in temperatuur tussen binnen en buiten.*

stand van 17°C, en 4,8°C voor een stand van 15°C.

Lekkage - voorbeeld: mijn huis

Mijn huis is een twee-onder-een-kapwoning met drie slaapkamers, gebouwd in 1940 (**Fig.E.7**). In 2006 werd de keuken iets uitgebreid en de meeste ramen zijn voorzien van dubbel glas. De voor- en achterdeur waren beide nog van enkel glas. Mijn raming van het lekkagecijfer van 2006 is opgenomen in tabel E.8. De totale lekkage bedroeg toen 322 W/°C (of 7,7 kWh/d/°C), waarbij warmtegeleidingslekken 72% en ventilatielekken 28% bijdroegen. Warmtegeleidingslekken waren bijna gelijk verdeeld over de drie gebieden: ramen, muren en vloer/plafond. Om de lekkage van twee gebouwen van verschillende grootte te vergelijken, kunnen we de lekkage delen door de woonoppervlakte, wat de warmteverliescoëfficiënt van het gebouw oplevert, in W/°C/m². Voor dit huis (totale woonoppervlakte 88 m²) is het



Fig.E.7: *Mijn huis*

$$3,7 \text{ W/°C/m}^2$$

Laten we deze waarden nemen en de dagelijkse energiebehoefte van het huis schatten, op een koude winterdag en als jaargemiddelde.

Op een koude dag met een buitentemperatuur van -1°C en een binnentemperatuur van 19°C, is het temperatuurverschil $\Delta T = 20^\circ\text{C}$. Als dit temperatuurverschil 6 uur per dag wordt aangehouden, dan is het energieverlies

$$322 \text{ W/°C} \times 120 \text{ graden-uren} \approx 39 \text{ kWh}.$$

Als de temperatuur gedurende 24 uur op 19°C wordt gehouden, bedraagt het energieverlies per dag.

$$155 \text{ kWh/d.}$$

Om een jaarlijks gemiddelde voor het energieverlies te krijgen, kunnen we de temperatuurbehoefte van Cambridge uit fig.E.5 gebruiken. Met de thermostaat op 19°C, was dit 2.866 graaddagen. Dus het gemiddelde verlies als het huis constant op 19°C wordt gehouden is:

$$7,7 \text{ kWh/d/°C} \times 2866 \text{ graaddagen/j} / (365 \text{ d/j}) = 61 \text{ kWh/d.}$$

Zet de thermostaat lager op 17°C en het verlies daalt tot 48 kWh/d. Zet het op een tropische 21°C en het verlies is 75 kWh/d.
[314]

Warmtegeleidingsverliezen	Oppervlakte (m ²)	U-waarde (W/m ² /°C)	Lekkage (W/°C)
Horizontale oppervlakken			
Schuin dak	48	<u>0,6</u>	28,8
Plat dak	1,6	3	4,8
Vloer	50	0,8	40
Verticale oppervlakken			
Wanden in het verlengde	24,1	0,6	14,5
Buitenmuren	50	<u>1</u>	50
Enkele wand (12cm)	36		
Ramen en deuren met enkel glas	7,35	<u>5</u>	36,7
Ramen met dubbele beglazing	17,8	2,9	51,6
Totaal warmtegeleidingsverliezen			232,4

Ventilatieverliezen	Volume (m ³)	N (Luchtverversing per st.d)	Lekkage (W/°C)
Slaapkamer	80	0,5	13,3
Keuken	36	2	24
Hal	27	<u>3</u>	27
Andere kamers	77	<u>1</u>	25,7
Totaal ventilatieverliezen			90

Tabel.E.8: Uitsplitsing van de lekkage van mijn huis door warmtegeleiding en ventilatie, vóór 2006. Ik heb de scheidingswand tussen de twee-onder-een-kapwoningen als een perfect geïsoleerde muur beschouwd, maar dit kan verkeerd zijn omdat de ruimte ertussen wordt geventileerd. Ik heb de parameters die ik na 2006 door een structurele wijziging heb gewijzigd, gemarkeerd --- (zie tekst).

Het effect van extra warmte-isolatie

In 2007 heb ik de volgende veranderingen aan het huis aangebracht:

1. extra tussenmuurisolatie (deze ontbrak in de hoofdmuren van het huis) - **Afb.21.5.**
2. versterking van de dakisolatie
3. extra voordeur buiten de bestaande - **Afb.21.6**
4. vervanging van de achterdeur door een deur met dubbele beglazing.
5. vervanging van het laatste enkele glasraam door dubbele beglazing.

Welke verandering in warmteverlies kan worden verwacht?

De totale lekkage voordien bedroeg 322 W/°C.

[315] De isolatie tussen de muren (nieuwe U-waarde 0,6) van de hoofdmuren verminderde de lekkage met 20 W/°C. De dakisolatie (nieuwe U-waarde 0,3) moet de lekkage met 14 W/°C verminderen. De verbeterde beglazing (nieuwe U-waarde 1,6 - 1,8) zou de warmtegeleiding met 23 W/°C en de ventilatieverliezen met ongeveer 24 W/°C moeten verminderen. Dit is een algemene verbetering van ongeveer 25%; van ongeveer 320 tot 240 W/°C (7,7 tot 5 kWh/d/°C). **Tabel E.9** toont de voorspelde besparingen van elke maatregel.

De warmteverliescoëfficiënt van het huis (woonoppervlakte 88 m²) wordt zo hopelijk met 25% verminderd, van 3,7 tot 2,7 W/°C/m². (Het is een lange weg naar de 1,1 W/°C/m² die een "duurzaam" huis volgens de nieuwe bouwvoorschriften zou moeten halen).

Het is frustrerend moeilijk om echt grote vooruitgang te boeken met de lekkage van een oud gebouw! Zoals we hierboven zagen, is het veel gemakkelijker om grote vooruitgang te boeken door de thermostaat lager te zetten. Verlaging van 20°C naar 17°C resulteerde in een vermindering van 30% van het warmteverlies.

De combinatie van deze twee maatregelen - isolatie achteraf en een lagere thermostaat - levert volgens het model een besparing op van iets minder dan 50%. Aangezien er nog steeds extra warmte in het huis wordt opgewekt, zou de verlaging van de gasrekening meer dan 50% moeten bedragen.

Ik heb al deze wijzigingen aangebracht en mijn meters wekelijks afgelezen. Ik kan bevestigen dat mijn verwarmingsrekening inderdaad met meer dan 50% is gedaald. Zoals in **Fig.21.4** te zien is, ging mijn gasrekening van 40 kWh/d naar 13 kWh/d - een vermindering van 67%.

• Spouwmuurisolatie (op 2/3 van het muuroppervlak)	4,8 kWh/d
• Verbeterde dakisolatie	3,5 kWh/d
• Verminderde warmtegeleiding in twee deuren en één raam (door dubbele beglazing)	1,9 kWh/d
• Minder tocht in hal en keuken door betere afdichting van deuren en ramen	2.9 kWh/d

Tabel.E.9: *Uitsplitsing van de voorspelde besparing op warmteverlies van mijn huis op een koude winterdag.*

Verbetering van het lekpercentage door binnenwandbekleding

Zou je de lekkage van een muur kunnen verminderen door de binnenkant van de

muur met isolatie te bedekken? Het antwoord is ja, maar er kunnen twee complicaties zijn. Ten eerste is de dikte van de extra isolatie groter dan je zou verwachten. Om van een massieve bakstenen muur van 24 gauge (U-waarde 2,2 W/m²/K) een mooie geïsoleerde muur van 0,30 W/m²/K te maken, hebt u ongeveer 6 cm dikke geïsoleerde gipsplaat nodig. Ten tweede kan er condensatie optreden op de tussenliggende oppervlakken, wat kan leiden tot damp- en vochtproblemen.

Als u niet zo'n grote vermindering van het lekpercentage nastreeft, kunt u ook volstaan met dunnere isolatie. Zo zijn bijvoorbeeld 1,8 cm dikke geïsoleerde wandpanelen met een U-waarde van 1,7 W/m²/K beschikbaar. Met zo'n paneel voor de bestaande muur verlaagt u de U-waarde van 2,2 W/m²/K tot

$$1 / \left(\frac{1}{2,2} + \frac{1}{1,7} \right) \approx 1 \text{ W/m}^2/\text{K} .$$

Zeker een vermindering die de moeite waard is.

[316] Luchtverversing

Als een gebouw echt goed geïsoleerd is, vindt het grootste energieverlies plaats door ventilatie (luchtverversing) in plaats van door warmtegeleiding. Warmteverlies door ventilatie kan worden beperkt door warmte van de uitgaande lucht over te brengen naar de inkomende lucht. Opmerkelijk: het grootste deel van de warmte kan in feite worden overgedragen zonder extra energie te gebruiken. De truc is om een neus te gebruiken, net als natuurlijke selectie. Een neus verwarmt binnenkomende lucht door uitgaande lucht af te koelen. Er is een temperatuurgradiënt in de neus, de wanden van de neus zijn het koudst in de buurt van de neusgaten. Hoe langer je neus, hoe beter hij werkt als een tegenstroom warmtewisselaar. In natuurlijke neuzen verandert de richting van de luchtstroom meestal. Een andere manier om een dergelijke neus te organiseren is het hebben van twee luchtdoorgangen, één voor de inwaartse stroming en één voor de uitwaartse stroming, gescheiden van elkaar uit het oogpunt van de luchtstroom, maar nauw met elkaar verbonden zodat de warmtestroom gemakkelijk tussen de twee kan plaatsvinden. Zo werken neuzen in gebouwen. Het is gebruikelijk om deze neuzen warmtewisselaars te noemen.



Fig.E.11: De warmtewisselaar in de "Heatkeeper"



Fig.E.10: De warmtebewaarder Serrekunda

Een energiezuinig huis

In 1984 bouwde energieconsultant Alan Foster een energie-efficiënt huis in de buurt van Cambridge; hij was zo vriendelijk mij zijn gedetailleerde meetresultaten ter beschikking te stellen. Het huis is een houtskelet bungalow gebaseerd op het Scandinavische "Heatkeeper Serrekunda" ontwerp (**Fig.E.10**), met 140 m² woonruimte verdeeld over drie slaapkamers, een studeerkamer, twee badkamers, een woonkamer, een keuken en een hal. De houten buitenmuren werden geleverd in prefab constructie door een Schots bedrijf, de ruwbouw werd in een paar dagen gebouwd. De muren zijn 30 cm dik en hebben een U-waarde van 0,28 W/m²/°C. Van binnenuit is het gebouwd met 13mm gipsplaat, 27mm luchtspleet, een damp-scherm, 8mm multiplex, 90mm steenwol, 12mm met bitumen geïmpregneerde vezelplaat, 50mm spouw, en 103mm baksteen. De plafondconstructie is vergelijkbaar met 100-200 mm steenwolisolatie. Het plafond heeft een U-waarde van 0,27 W/m²/°C, de vloer 0,22 W/m²/°C. De ramen zijn voorzien van dubbele beglazing (U-waarde 2 W/m²/°C), waarbij de buitenste oppervlakken van de binnenste ruiten speciaal zijn gecoat om de straling te minimaliseren. De ramen zijn zo geplaatst dat er een aanzienlijke zonnewinst is, die ongeveer 30% bijdraagt aan de ruimteverwarming. Het huis is goed afgedicht, elke deur en raam met neopreen afdichtingen. Het huis wordt verwarmd door warme lucht die binnenkomt via roosters in de vloer. In de winter verwijderen pompen muffe lucht uit sommige kamers en voeren die naar buiten, en ze zuigen verse lucht aan via de zolderruimte. Beide luchtstromen gaan door een warmtewisselaar (**Fig.E.11**) die 60% van de warmte uit de uitlaatlucht terugwint. De warmtewisselaar is een passief onderdeel dat geen energie nodig heeft: Het werkt als een grote metalen neus die de binnenkomende lucht verwarmt op de uitgaande. [317] Op een koude winterdag was de buitenluchttemperatuur -8°C, de temperatuur bij de luchtinlaat op zolder 0°C, en de verse lucht na de warmtewisselaar +8°C.

Gedurende de eerste 10 jaar werd alle benodigde warmte geleverd door elektrische kachels, die een thermische opslag van 650 l verwarmden met behulp van goedkope nachstroom. Pas onlangs werd het huis aangesloten op de gasvoorziening en sindsdien verwarmt een condensatieketel op gas de warmteopslagtank.

Het warmteverlies door warmtegeleiding en ventilatie bedraagt 4,2 kWh/d/°C. De warmteverliescoëfficiënt (lekkage per m² woonoppervlak) is 1,25 W/m² (vergelijk mijn huis met 2,7 W/m²/°C).

Met twee bewoners en een thermostaat die overdag op 19 of 20°C is ingesteld, bedroeg het gemiddelde energieverbruik van het huis voor verwarming 8.100 kWh per jaar of 22 kWh/d of 6,6 W/m²; het totale energieverbruik voor alle belastingen bedroeg 15.000 kWh per jaar of 40 kWh/d. Uitgedrukt als gemiddeld vermogen per oppervlakte-eenheid, is dit 12,2 W/m².

In **Fig.E.12** wordt het stroomverbruik van dit huis per oppervlakte-eenheid vergeleken met mijn huis (voor en na de rendementsverbetering) en met het Europese gemiddelde. Het verbruik van mijn huis na de rendementsverbetering ligt dicht bij dat van de Heatkeeper, dankzij de lagere thermostaatstanden.

Parameters voor huizen en kantoren

De Duitse Passiefhuis-norm streeft naar een energievraag voor verwarming en koeling van $15 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ ($1,7 \text{ W/m}^2$) en een totale energievraag van $120 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$, d.w.z. $13,7 \text{ W/m}^2$.

Het gemiddelde energieverbruik in de Engelse dienstensector per eenheid commerciële ruimte bedraagt 30 W/m^2 .

Een energiezuinig kantoor ^{Q41}

De National Energy Foundation bouwde voor zichzelf een goedkoop, energiezuinig kantoorgebouw. Het heeft zonnepanelen voor warm water op zonne-energie en een PV-systeem met een maximaal vermogen van $6,5 \text{ kW}$, en wordt verwarmd door een 14 kW aardwarmtepomp, met af en toe het gebruik van een houtkachel. De kantoorruimte is 400 m^2 voor ongeveer 30 personen. Het is een gebouw met één verdieping. De muren bevatten 300 mm steenwolisolatie. De prestatiecoëfficiënt (COP) van de warmtepomp in de winter was 2,5. De benodigde energie bedraagt 65 kWh per jaar per vierkante meter kantoorruimte ($7,4 \text{ W/m}^2$). Het PV-systeem levert bijna 20% van deze energie.

Moderne kantoorgebouwen

Nieuwe kantoorgebouwen worden vaak aangeprezen als bijzonder milieuvriendelijk. Laten we eens kijken naar wat cijfers hierover.

In het William Gates Building van de universiteit van Cambridge zijn onderzoekers op het gebied van informatica, de administratie en een klein café gevestigd. De oppervlakte bedraagt 11.110 m^2 en de energiebehoefte 2.392 MWh/jaar . Per oppervlakte-eenheid komt dit neer op een vermogen van $215 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ of 25 W/m^2 . Het gebouw won de RIBA Award 2001 voor zijn geadverteerde energiebesparingen. "De architecten hebben veel milieuvriendelijke aspecten in het gebouw verwerkt." [5dhups]

41) ^{Q41} De waarde voor "het huis van de Heatkeeper" (rij vier van de tabel, bij "Homes") is onjuist volgens de informatie in de errata van de auteur, maar moet $12,2 \text{ W/m}^2$ zijn. Op dezelfde plaats zegt de auteur: Een ander probleem met Fig.E.12 is dat de PassivHaus-norm een andere conventie voor de bepaling van het stroomverbruik volgt: Vermogen wordt daar gemeten aan de hand van "primair energieverbruik", hetgeen kennis vereist van de bron van elektriciteit en brandstof, en mogelijk ook van omzettingcoëfficiënten. Dit betekent dat de PassivHaus-norm nog strenger is dan hier wordt gesteld, maar hoeveel strenger hangt af van de energiemix.

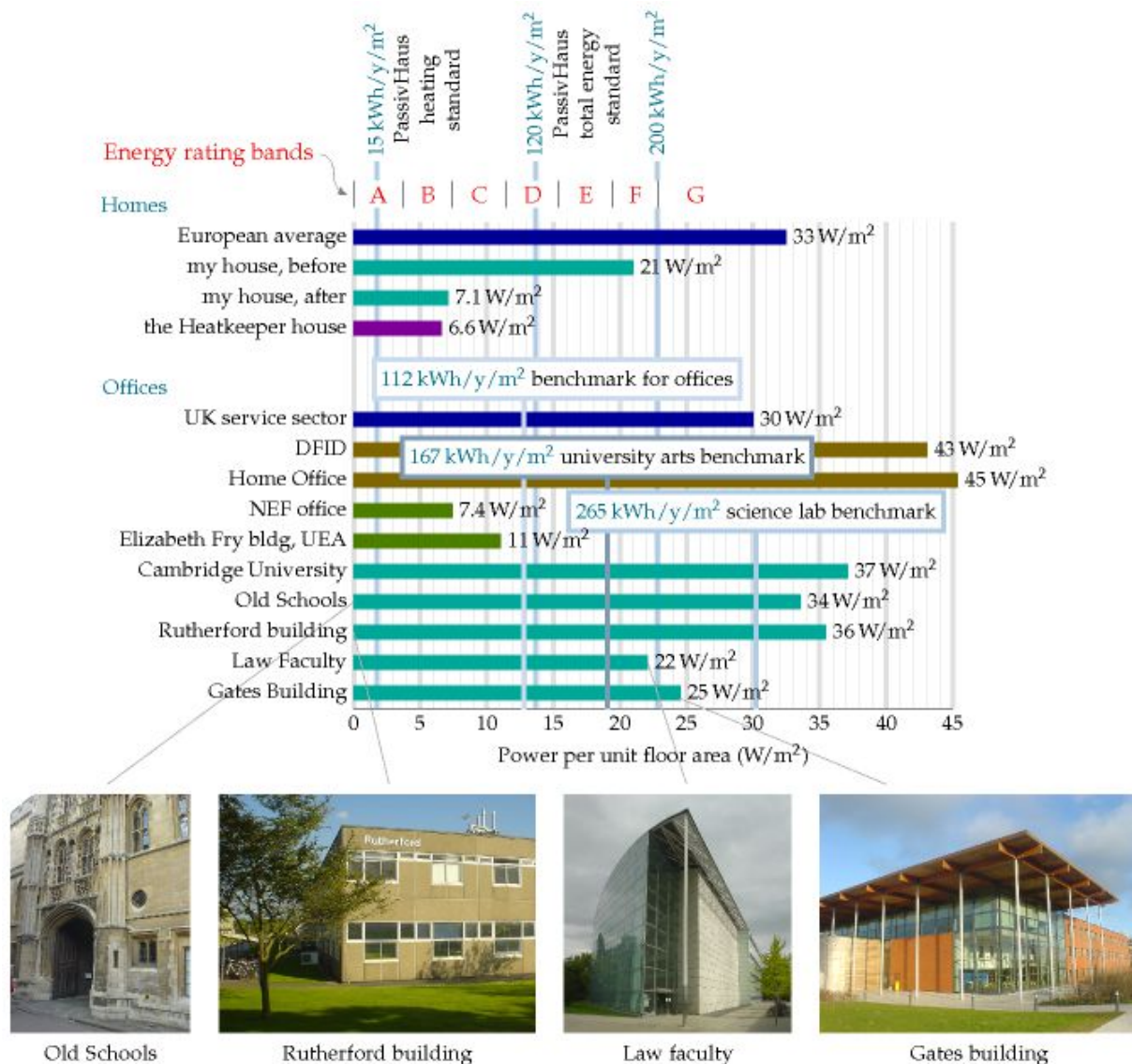


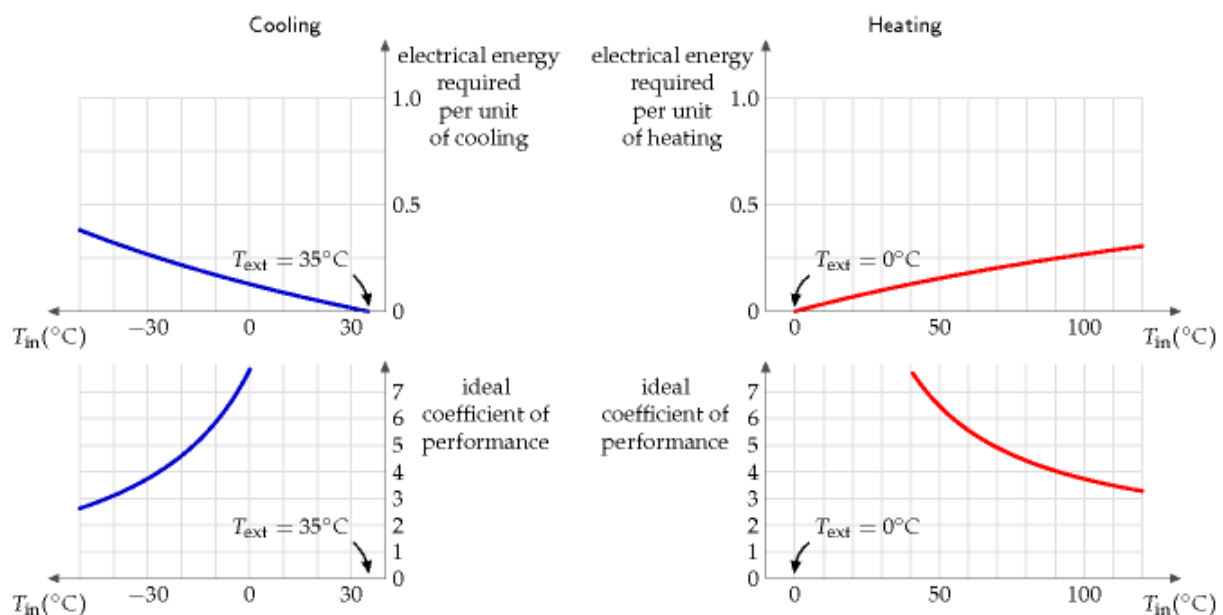
Fig.E.12. *Gebouw metriek. Energievraag per oppervlakte in verschillende woon- en kantoor-gebouwen zie ook ^{Q41}.*

[318] Maar zijn deze gebouwen indrukwekkend? Een deur verder staat het Rutherford Building, gebouwd in 1970 zonder eco-frills - zelfs zonder dubbele beglazing - met een vloeroppervlak van 4.998 m² en een verbruik van 1.557 MWh/jaar; dat is 0,85 kWh/d/m² of 36 W/m². Het met de RIBA bekroonde huis is dus slechts 30% beter, in termen van energieverbruik per oppervlakte, dan zijn buurman uit de jaren 1970. **Afb.E.12** vergelijkt deze twee gebouwen en een ander nieuw gebouw, de Law School, met de Old Schools, een oud gebouw van voor 1890. Ondanks alle ophef is het verschil tussen nieuwe en oude gebouwen echt heel teleurstellend! Merk op dat het energieverbruik van een gebouw in dezelfde eenheden (W/m²) wordt weergegeven als de hernieuwbare energiebronnen die we op blz. 48, 52 en [197] hebben besproken. Een vergelijking van deze opwekkings- en verbruikscijfers helpt ons te begrijpen hoe moeilijk het is moderne gebouwen van energie te voorzien met

ter plaatse geproduceerde hernieuwbare energie. De output per oppervlakte-eenheid voor biobrandstoffen (**Fig.6.11**, blz. 48) is $0,5 \text{ W/m}^2$, voor windmolenparken 2 W/m^2 , voor PV 20 W/m^2 (**Fig.6.18**, blz. 52); alleen modules voor thermisch warm water op zonne-energie komen met 53 W/m^2 in de buurt (**Fig.6.3**, blz. 43).

Verbetering van de efficiëntie

U zou kunnen denken dat de efficiëntie van een condensatieketel, die meestal 90% bedraagt, moeilijk te overtreffen is. En toch, met warmtepompen, kan je daar aanzienlijk boven geraken. De condensatieketel gebruikt chemische energie en zet die om in 90% bruikbare warmte, maar een warmtepomp gebruikt elektrische energie en duwt die warmte van de ene plaats naar de andere (bv. van buiten het gebouw naar binnen). Gewoonlijk is bij dit proces de hoeveelheid nuttige warmte aanzienlijk groter dan de benodigde elektrische energie. Een rendement, een zogenaamde prestatiecoëfficiënt van 3 of 4 (300 of 400 %) is normaal.



Afb.E.13: Rendement van ideale warmtepompen. Linksboven: de ideale energie die volgens de wetten van de thermodynamica nodig is om warmte te pompen uit een ruimte met temperatuur T_{in} wanneer de temperatuur van de buitenruimte waar de warmte wordt gepompt $T_{out} = 35^\circ\text{C}$ bedraagt. Rechts: de ideale energie die nodig is om warmte in een ruimte met temperatuur T_{in} te pompen wanneer de temperatuur van de buitenruimte waar de warmte vandaan wordt gehaald $T_{out} = 0^\circ\text{C}$ is. Onderste rij: het rendement wordt meestal uitgedrukt als Coefficient of Performance (COP), de verhouding tussen de opgewekte warmte en de gebruikte elektrische energie. In de praktijk halen professioneel geïnstalleerde bodemwarmtepompen en de beste luchtwarmtepompen een prestatiecoëfficiënt van 3 of 4, maar de wettelijke voorschriften in Japan hebben de prestatiecoëfficiënt opgedreven tot 6,6.

Theorie van warmtepompen

Dit zijn de rendementsformules voor een ideale warmtepomp, d.w.z. voor de elektrische energie die nodig is voor één eenheid gepompte warmte-energie. Als we

warmte van buiten (buitentemperatuur T_1) naar een warmere plaats (binnentemperatuur T_2) willen pompen, is het ideale rendement

$$\text{Efficiëntie} = \frac{T_1}{T_2 - T_1},$$

waarbij T_1 en T_2 moeten worden gespecificeerd ten opzichte van het absolute nulpunt (d.w.z. T_2 in Kelvin wordt berekend door de Celsius-temperatuur T_{in} te delen door $273,15 + T_{in}$). Als we warmte willen pompen van een locatie met temperatuur T_2 naar het warmere buiten met temperatuur T_1 , dan is het rendement in het ideale geval

$$\text{Efficiëntie} = \frac{T_1}{T_1 - T_2},$$

[320] Systemen bereiken deze theoretische grenzen alleen als ze oneindig langzaam pompen. Het is duidelijk dat hoe dichter de buitentemperatuur bij de binnentemperatuur ligt, hoe hoger het rendement. In theorie zouden grondwarmtepompen het hoogste rendement moeten hebben, omdat de bodemtemperatuur gewoonlijk dichter bij de binnentemperatuur ligt dan de buitenluchttemperatuur, maar in de praktijk zijn luchtwarmtepompen de beste en gemakkelijkste keuze. In steden is er onzekerheid over het toekomstige rendement van een bodemwarmtepomp, want hoe meer mensen een bodemwarmtepomp laten draaien, hoe kouder de grond wordt; hetzelfde probleem kan zich omgekeerd voordoen in de zomer, wanneer warmtepompen worden gebruikt voor airconditioning.

[319]

Warmtecapaciteit:	$C = 820 \text{ J/kg/K}$
Geleidingsvermogen:	$\kappa = 2,1 \text{ W/m/K}$
Dichtheid:	$\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$
Warmtecapaciteit per volume-eenheid:	$CV = 2,3 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$

Tabel E.14: Statistieken voor graniet (ik gebruik graniet als voorbeeld van een typisch gesteente).

	(W/m/K)
Water	0,6
Kwarts	8
Graniet	2,1
Ederust	1.7
Droge grond	0,14

Tabel E.15: Warmtegeleidingscoëfficiënten. Voor meer gegevens, zie tabel E.18 op blz. 324.

Verwarming en de bodem

Je kunt hier een interessante berekening over maken. Stelt u zich voor dat u een zonneboiler op het dak had en dat u, telkens wanneer het water boven 50°C werd verwarmd, het door een grote steen onder uw huis pompte. Als er nu een koude, natte, grijze maand komt, kunt u de warmte van de rots gebruiken om uw huis te

verwarmen. Hoe groot zou de steen van 50°C moeten zijn om genoeg energie te hebben om je huis een maand lang te verwarmen? Stel dat we gedurende 30 dagen 24 kWh per dag nodig hebben en het huis is 16°C. De warmtecapaciteit van graniet is $0,195 \cdot 4.200 \text{ J/kg/K} = 820 \text{ J/kg/K}$. De benodigde massa graniet is

$$\begin{aligned} \text{Massa} &= \frac{\text{Energie}}{\text{Warmtecapaciteit} \times \text{Temperatuurverschil}} \\ &= \frac{24 \times 30 \times 3,6 \text{ MJ}}{(820 \text{ J/kg/}^\circ\text{C})(50^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C})} \\ &= 100.000 \text{ kg}, \end{aligned}$$

100 ton, wat overeenkomt met een kubus van 6m x 6m x 1m.

Aarden opslag zonder muren

OK, we hebben de grootte van een bruikbare aarden opslagtank berekend. Maar is het moeilijk om de warmte erin te houden? Moeten we het rotsblok omringen met speciale isolatie? Het blijkt dat de grond zelf een relatief goede isolator is. Een kleine warmtepiek die in een gat wordt gebracht, verspreidt zich volgens

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(\kappa/(C\rho))t}\right)$$

[321] waarin κ het geleidingsvermogen van de bodem is, C de warmtecapaciteit en ρ de dichtheid. Dit beschrijft een belkromme met breedte

$$\sqrt{2\frac{\kappa}{C\rho}t};$$

na zes maanden, bijvoorbeeld ($t = 1,6 \times 10^7 \text{ s}$), met de gegevens voor graniet ($C = 0,82 \text{ kJ/kg/K}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $\kappa = 2,1 \text{ W/m/K}$), is de breedte 6 m. Met de gegevens voor water ($C = 4,2 \text{ kJ/kg/K}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\kappa = 0,6 \text{ W/m/K}$), is de breedte 2 m. Dus als het opslaggebied groter is dan 20 m x 20 m x 20 m is de meeste opgeslagen warmte er na zes maanden nog steeds (omdat 20 m aanzienlijk groter is dan 6 m of 2 m).

Beperkingen van aardwarmtepompen

De lage thermische geleidbaarheid van de grond is een tweesnijdend zwaard. Dankzij dit lage geleidingsvermogen houdt de grond de warmte langer goed vast. Anderzijds betekent het lage geleidingsvermogen dat het niet gemakkelijk is om warmte snel in en uit de grond te pompen. Laten we eens kijken hoe geleidbaarheid het gebruik van geothermische warmtepompen beperkt.

temperature (°C)

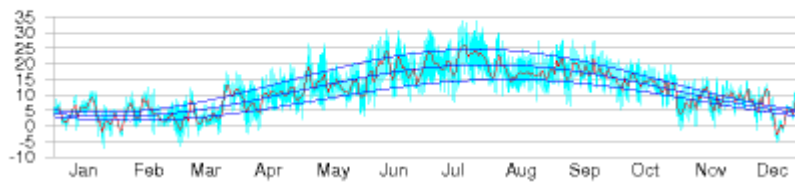


Fig.E.16: De temperatuurcurve van Cambridge en een fit die de temperatuur benadert als een superpositie van een jaarlijkse sinusoidale variatie

tussen 3°C en 20°C en een dagelijkse sinusoidale variatie met een amplitude tot 11,3°C. De gemiddelde temperatuur is 11,5°C.

Laten we eens kijken naar een buurt met een vrij hoge bevolkingsdichtheid. Kan iedereen geothermische warmtepompen gebruiken, zonder actieve recirculatie in de zomer (zoals beschreven op blz. [169]) De zorg is dat als we allemaal tegelijk warmte uit de grond zuigen, we het kunnen laten bevriezen tot ijs. Ik zal deze vraag benaderen met twee berekeningen. Eerst bepaal ik de natuurlijke warmtestroom in en uit de grond in de zomer en de winter. Als de warmteflux die we in de winter uit de grond willen zuigen aanzienlijk hoger is dan de natuurlijke flux, dan weten we dat ons zuigen de temperatuur van de grond aanzienlijk zal veranderen en daarom waarschijnlijk niet kan werken. Voor deze berekening ga ik ervan uit dat de grondtemperatuur in de loop van het jaar langzaam op en neer beweegt onder invloed van de zon, de wolken en de nachtelijke hemel (Fig.E.16).

De effecten van externe temperatuursverandering

Om het effect van de buitentemperatuur in de bodem en de verschillende stromen van energie in en uit de bodem te bepalen is wat hogere wiskunde nodig, die ik naar het eind van dit hoofdstuk heb verplaatst in kader E.19.

Het resultaat van deze berekening is een mooi diagram (Fig.E.17) dat laat zien hoe de temperatuur zich op elke diepte ontwikkelt. Zij is van toepassing op elk bodemmateriaal, aangezien de materiaaleigenschappen uitsluitend liggen in de karakteristieke lengte z_0 (Vergelijking E.7), die afhangt van de geleidbaarheid κ en de warmtecapaciteit CV , en van de frequentie ω van de temperatuurverandering. (Met deze theorie kunnen dag- en seizoensvariaties even goed worden beschreven). Op diepte $2z_0$ is de temperatuurschommeling nog steeds een zevende van die aan de oppervlakte, en is zij vertraagd met ongeveer een derde van een periode. [322] Op diepte $3z_0$ is de variatie nog steeds een twintigste en wordt met een halve periode vertraagd.

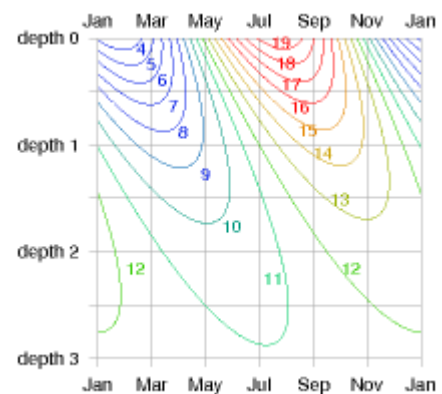


Fig.E.17: Temperatuur (in °C) vs. diepte en tijd. De diepte wordt opgegeven in veelvouden van de karakteristieke lengte z_0 , die voor graniet 3 m bedraagt. Op "diepte 2" (6 m) bedraagt de temperatuur altijd 11 of 12 °C. Op "diepte 1" schommelt het nog tussen 8 en 15°C.

In het geval van dagelijkse schommelingen in graniet is de karakteristieke lengte $z_0 = 0,16$ m. (32 cm steen is dus de dikte die nodig is om de dagelijkse temperatuurschommelingen af te schermen). Voor seizoensgebonden variaties in graniet is de karakteristieke lengte $z_0 = 3$ m.

Laten we ons concentreren op de jaarlijkse variaties en enkele andere materialen in overweging nemen. De karakteristieke lengten voor verschillende materialen staan in de derde kolom van tabel E.18. Voor vochtige zandgronden of voor beton zijn de karakteristieke lengten vergelijkbaar met die van graniet - ongeveer 2,6 m. In droge of veenachtige bodems is de karakteristieke lengte z_0 korter - ongeveer 1,3 m. Dat is misschien goed nieuws, want dat betekent dat je daar niet zo diep hoeft te graven om grond met een constante temperatuur te vinden. Maar het is ook slecht nieuws: het natuurlijke debiet is ook lager in droge bodems.

De natuurlijke flux varieert in de loop van het jaar en heeft een piekwaarde (vergelijking (E.9)) die kleiner is naarmate het geleidingsvermogen afneemt.

In het geval van graniet bedraagt de maximale flux 8 W/m^2 . Voor droge bodems ligt de maximale flux tussen $0,7 \text{ W/m}^2$ en $2,3 \text{ W/m}^2$, voor natte bodems tussen 2 W/m^2 en 8 W/m^2 .

Wat betekent dit? Ik stel voor dat we uitgaan van een flux in het midden van deze getallen, 5 W/m^2 , als praktische parameter om een schatting te krijgen van het vermogen dat we met een geothermische warmtepomp per oppervlakte-eenheid uit de grond kunnen pompen. Als wij een flux aanzuigen die aanzienlijk kleiner is dan deze 5 W/m^2 , zal de verstoring die wij veroorzaken ten opzichte van de natuurlijke flux gering zijn. Als we daarentegen zuigen met een flux van meer dan 5 W/m^2 , moeten we verwachten dat we de bodemtemperatuur aanzienlijk van de natuurlijke waarde zullen doen afwijken en dat dergelijke fluxen in het geheel niet haalbaar zijn.

De bevolkingsdichtheid van een typische Engelse voorstadsnederzetting komt overeen met ongeveer 160 m^2 per persoon (rijtjes halfvrijstaande huizen met 400 m^2 per huis, inclusief straten en erven). Bij deze bevolkingsdichtheid kunnen we de orde van grootte berekenen voor de vermogensbarrière van de warmtepomp:

$$5 \text{ W/m}^2 \times 160 \text{ m}^2 = 800 \text{ W} = 19 \text{ kWh/d per persoon.}$$

Dit is onaangenaam dicht bij het vermogen dat we in de winter zouden willen pompen: Het is waarschijnlijk dat onze piekvraag in de winter voor warme lucht en warm water kan oplopen tot een goede 40 kWh/d per persoon voor een oud huis als het mijne.

Deze berekening suggereert dat *niet iedereen in een stedelijke nederzetting een bodemwarmtepomp kan gebruiken*, tenzij ervoor wordt gezorgd dat de warmte in de zomer actief in de grond wordt teruggepompt.

[323] Laat mij een tweede berekening maken en afleiden welk vermogen gestadig kan worden aangezogen met een pijplus op een diepte $h = 2\text{m}$. We laten de temperatuur aan de buisleiding dalen met $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ onder de gemiddelde grondtemperatuur aan het oppervlak en veronderstellen een constante grondtemperatuur aan het oppervlak. Dan kunnen we de warmteflux van het oppervlak berekenen. Uitgaande van een geleidingsvermogen van $1,2\text{ W/m/K}$ (typisch voor vochtige kleigrond).

$$\text{Flux} = h \Delta T \kappa \times = 3\text{ W/m}^2.$$

Als we opnieuw uitgaan van een bevolkingsdichtheid van 160 m^2 per persoon zoals hierboven, is het maximale verwarmingsvermogen van een aardwarmtepomp, als iedereen in de buurt er een heeft, 480 W of 12 kWh/d per persoon.

Dus concluderen we opnieuw dat in een typische nederzetting met slecht geïsoleerde huizen zoals het mijne, niet iedereen een aardwarmtepomp kan laten draaien, tenzij hij ervoor zorgt dat hij in de zomer actief warmte terug de grond in pompt. In grote steden met een nog hogere bevolkingsdichtheid zijn grondwarmtepompen waarschijnlijk helemaal niet levensvatbaar.

	Warmte geleidings- vermogen κ (W/m/K)	Warmte Capaciteit CV (MJ/m ³ /K)	Charact. Lengte z_0 (m)	Debiet $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ (W/m ²)
Lucht	0,02	0,0012		
Water	0,57	4,18	1,2	5,7
Graniet	2,1	2,3	3,0	8,1
Beton	1,28	1,94	2,6	5,8
Zandgrond				
droog	0,30	1,28	1,5	2,3
50% vochtig	1,80	2,12	2,9	7,2
100% vochtig	2,20	2,96	2,7	9,5
Kleigrond				
droog	0,25	1,42	1,3	2,2
50% vochtig	1,18	2,25	2,3	6,0
100% vochtig	1,58	3,10	2,3	8,2
Veengrond				
droog	0,06	0,58	1,0	0,7
50% vochtig	0,29	2,31	1,1	3,0
100% vochtig	0,50	4,02	1,1	5,3

Tabel E.18: Warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit van verschillende materialen en bodems, de afgeleide karakteristieke lengte

$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V\omega}}$ en de maximale flux $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ voor jaarlijkse voor jaarlijkse temperatuurschommelingen met een amplitude van $8,3^\circ\text{C}$. De zand- en kleigrond hebben een porositeit van 0,4; veengrond heeft een porositeit van 0,8.

Daarom adviseer ik luchtwarmtepompen als de beste verwarmingsoptie voor de meeste mensen.

Thermische massa

Draagt het verhogen van de thermische massa van een gebouw bij tot lagere verwarmings- en koelingskosten? Dat hangt ervan af. De buitentemperatuur kan overdag met ongeveer 10°C variëren. Een gebouw met een grote thermische massa (zoals een gebouw met dikke stenen muren) zal deze schommelingen op natuurlijke wijze compenseren en de binnentemperatuur rond de gemiddelde buitentemperatuur houden zonder verwarming of koeling. Dergelijke gebouwen zullen in Engeland gedurende vele maanden geen koeling of verwarming nodig hebben. [324] Een slecht geïsoleerd huis met een lage thermische massa kan daarentegen overdag als te warm en 's nachts als te koud worden ervaren, wat leidt tot een grotere behoefte aan verwarming en koeling.

Een grote thermische massa is echter niet altijd een voordeel. Als een ruimte in de winter slechts enkele uren per dag wordt gebruikt (zoals een leeszaal), hoe groter de thermische massa, hoe groter de energie die nodig is om de ruimte op een comfortabele temperatuur te brengen. De extra geïnvesteerde warmte wordt langer vastgehouden in een thermisch massieve kamer, maar als er niemand is om ervan te genieten, wordt deze energie verspild. In het geval van onregelmatig gebruikte ruimten is het zinvol te streven naar een bouwwijze met een lage thermische massa en de lage massa snel op te warmen wanneer dat nodig is.

Opmerkingen en referenties

Pagina	
[323]	Tabel E.18 Bron: Bonan (2002), www-hukseflux.com/thermalScience/thermalConductivity.html
	Indien we aannemen dat de bodem bestaat uit vast, homogeen materiaal met geleidingsvermogen κ en warmtecapaciteit C_V, dan volgt de temperatuur op diepte z onder het oppervlak, op tijdstip t, de invallende temperatuur aan het oppervlak volgens de diffusievergelijking $\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_V} \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}. \quad (\text{E.4})$ Als er een sinusoidaal temperatuurprofiel met frequentie ω en amplitude A bestaat op het oppervlak $z = 0$, $T(0,t) = T_{\text{Oberfläche}}(t) = T_{\text{mittel}} + A \cos(\omega t), \quad (\text{E.5})$ dan is de resulterende temperatuur op diepte z op tijdstip t een afnemende en oscillerende functie $T(z,t) = T_{\text{mittel}} + A e^{-z/z_0} \cos(\omega t - z/z_0), \quad (\text{E.6})$ waarbij z_0 een karakteristieke lengte is voor zowel de val als de oscillatie $z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V \omega}}. \quad (\text{E.7})$ De warmteflux (het vermogen per oppervlakte-eenheid) op diepte z is $\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} e^{-z/z_0} \sin(\omega t - z/z_0 - \pi/4). \quad (\text{E.8})$ Bijvoorbeeld, aan de oppervlakte is de maximale flux $\kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} = A \sqrt{C_V \kappa \omega}. \quad (\text{E.9})$ Kader.E.19: Afleiding van de natuurlijke warmteflux veroorzaakt door sinusvormige temperatuurschommelingen.

F golven-II

Aanhangsel F: Golven II

De fysica van golven in diep water

Golven bevatten energie in twee vormen: potentiële energie en kinetische energie. Potentiële energie is de energie die nodig is om het water van de golfdal naar de top van de golf te verplaatsen. Kinetische energie wordt in verband gebracht met de beweging van het water.

Sommige mensen denken dat als een top van een golf zich met 50 km/u over de oceaan beweegt, het water zich ook met 50 km/u in dezelfde richting moet bewegen. Maar dat is niet het geval. Het is als een La-Ola golf. Als de golf rond het stadion gaat, is dat niet de reden waarom alle betrokkenen rond het stadion rennen, ze stuiteren gewoon een beetje op en neer. De beweging van een stuk water in de oceaan is vergelijkbaar: als je naar een stuk zeewier kijkt dat in het water drijft terwijl er een golf passeert, zul je het een beetje op en neer zien bewegen, en ook een beetje heen en weer in de richting van de golfslag - het exacte effect zou in een LaOla-golf kunnen worden geproduceerd als de mensen zich zouden bewegen als een glazenwasser, die een groot stuk glas in een cirkelvormige beweging schoonmaakt. De golf heeft potentiële energie door de stijging van de kammen over de dalen van de golf. En het heeft kinetische energie vanwege de kleine circulaire oscillerende beweging van het water.

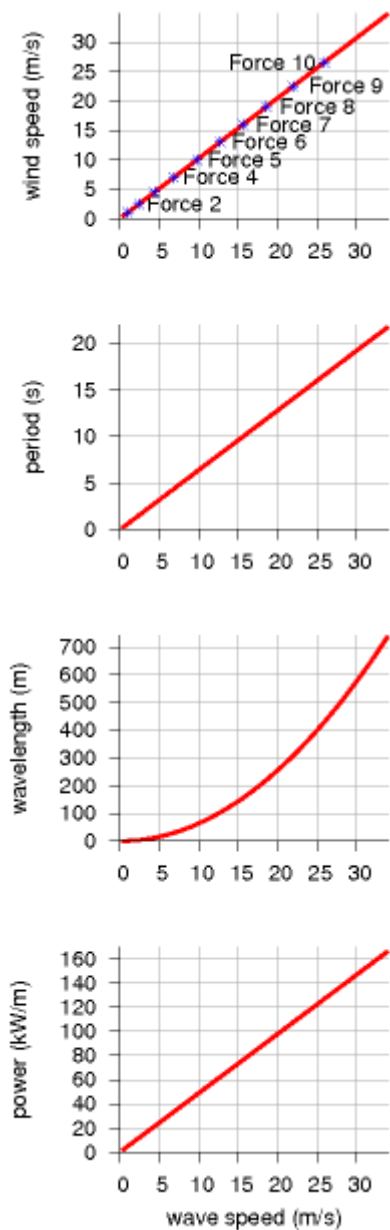


Fig.F.1: Feiten over golven in diep water. In alle vier de grafieken is de horizontale as de golfsnelheid in m/s. De afzonderlijke grafieken tonen (van boven naar beneden): windsnelheid (in m/s) die nodig is om golven van die snelheid te genereren; periode van de golf (in seconden); golflengte (in m) en vermogensdichtheid (in kW/m) van een golf met een amplitude van 1 m.

Onze ruwe schatting van de energie in oceaangolven vereist drie gegevens: een schatting van de trillingsperiode T van de golven (de tijd tussen de toppen), een schatting van de hoogte h van de golven, en een formule waarmee we de snelheid v van de golf uit de periode kunnen bepalen. De golflengte λ en de periode van de golf (respectievelijk de afstand en de tijd tussen de kammen) hangen beide af van de snelheid van de wind die de golven opwekt, volgens Fig.F.1. De hoogte h van de golf hangt niet af van de snelheid van de wind, maar van hoe lang de wind over het wateroppervlak strijkt.

Je kunt de periode van oceaangolven schatten door het tijdsinterval te onthouden tussen twee golven die na elkaar op het strand aankomen. Is 10 seconden redelijk? Laten we voor de hoogte van oceaangolven uitgaan van een amplitude van 1 m, hetgeen betekent dat de afstand tussen het dal en de top 2 m bedraagt. In golven van deze hoogte zou een man in een kleine boot niet over de top van de volgende golf kunnen kijken als hij zich in het dal bevond; ik denk dat dit boven het gemiddelde ligt, maar we kunnen deze waarde goed gebruiken.

[326] herzien als we dat nodig achten. De snelheid van golven in diep water is gerelateerd aan de tijd T tussen twee kammen door de formule (zie Faber (1995), p.170):

$$v = \frac{gT}{2\pi},$$

waarin g de versnelling van de zwaartekracht is ($9,8 \text{ m/s}^2$). Bijvoorbeeld, als $T = 10 \text{ s}$, volgt hieruit dat $v = 16 \text{ m/s}$. De golflengte van zo'n golf - de afstand tussen de kammen - is $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$.

Voor een golf met golflengte λ en periode T , bij een kruinhoogte en trogdiepte van elk 1 m, is de potentiële energie die per tijdseenheid, per lengte-eenheid, passeert

$$P_{pot} \approx m^* gh'/T, \quad (\text{F.1})$$

Hierin is m^* de massa per lengte-eenheid, die ongeveer $\frac{1}{2} \rho h(\lambda/2)$ is (waarbij het gearceerde golfgebied van **fig.F.2** wordt benaderd door de oppervlakte van een driehoek), en h' de verandering in de hoogte van het zwaartepunt van het door de golf opgetilde deel van het water, die ongeveer gelijk is aan h . Aldus

$$P_{pot} \approx \frac{1}{2} \rho h \frac{\lambda}{2} gh/T. \quad (\text{F.2})$$

(Om de potentiële energie correct te vinden, zou men hier moeten integreren, wat hetzelfde resultaat zou hebben opgeleverd). Nu is λ/T gewoon de snelheid v waarmee de golf reist, dus.

$$P_{pot} \approx \frac{1}{4} \rho g h^2 v . \quad (F.3)$$

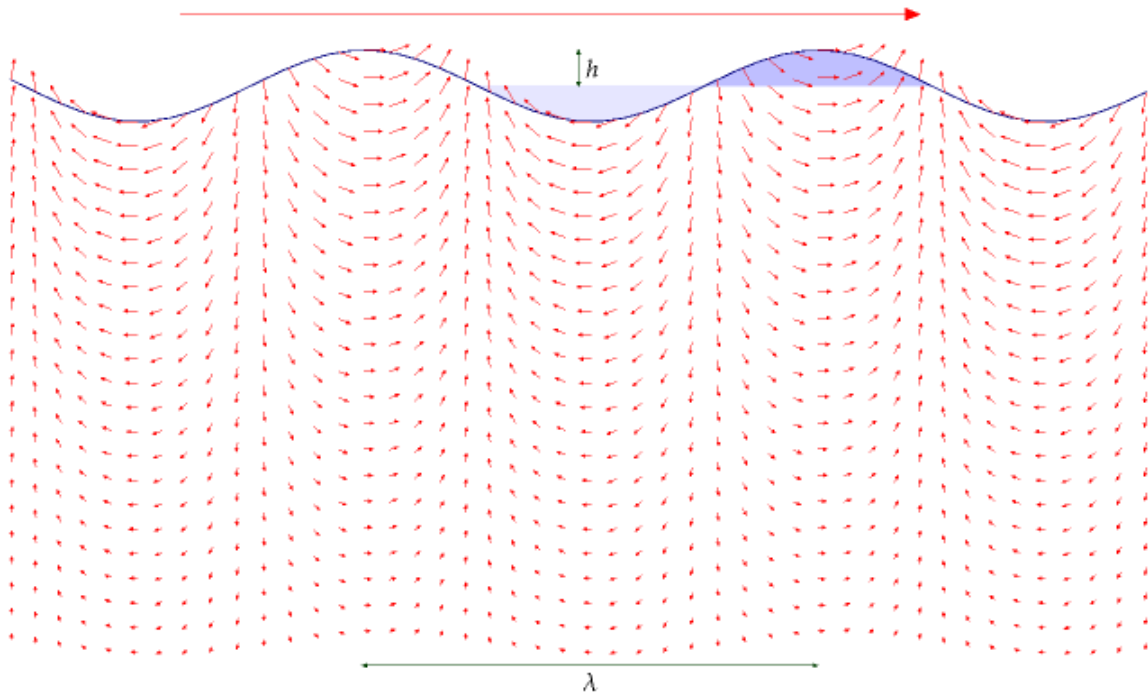


Fig.F.2: Golven bevatten energie in twee vormen: potentiële energie door het optillen van water van het licht gearceerde dalgebied naar de donker gearceerde top; en kinetische energie door het bewegen van water tot op enkele golflengten onder het oppervlak - de snelheden zijn aangegeven met kleine rode pijlen. De snelheid van de golf zelf, wordt weergegeven door de veel grotere pijl hierboven. –

[327] Golven hebben zowel kinetische als potentiële energie, en interessant genoeg zijn die twee precies hetzelfde, hoewel ik de afleiding hier niet weergeef. Het totale vermogen is dus precies het dubbele van het berekende vermogen uit de potentiële energie.

$$P_{ges} \approx \frac{1}{2} \rho g h^2 v . \quad (F.4)$$

Er is echter één ding mis met dit resultaat: het is te groot omdat wij een essentiële eigenschap van dispersieve golven hebben verwaarloosd: De energie in de golf verplaatst zich niet met dezelfde snelheid als de golftoppen, maar plant zich voort met een snelheid die de groepssnelheid wordt genoemd. Voor golven in diep water is de groepssnelheid de helft van de snelheid v . U kunt waarnemen dat de energie trager reist dan de kammen van de golven als u een steentje in een vijver gooit en goed naar de golven kijkt. Dit betekent dat vergelijking (F.4) fout is, we moeten haar hal-

veren. Het juiste vermogen per lengte-eenheid van een golffront is

$$P_{ges} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v . \quad (F.5)$$

Als we nu $v = 16$ m/s en $h = 1$ m zetten, vinden we.

$$P_{ges} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v = 40 \text{ kW/m} . \quad (F.6)$$

Deze ruwe schatting komt goed overeen met metingen in de Atlantische Oceaan (Mollison, 1986). (Zie bladzijde [085].)

Verliezen ten gevolge van viscositeit zijn minimaal. Een golf met een periode van 9 seconden zou drie keer rond de aarde moeten reizen om 10% van zijn amplitude te verliezen.

Praktische golflagenenergiecentrales

Diepwatersystemen

Hoe doeltreffend zijn echte systemen in het omzetten van energie uit golven? Stephen Salter's "eenden" verdienen hun naam: Een serie eenden, elk met een diameter van 16 m, vrat Atlantische golven met een gemiddeld vermogen van 45 kW/m en kon 19 kW/m leveren, inclusief transmissie naar centraal Schotland (Mollison, 1986).

Ocean Power Delivery's "Pelamis" heeft nu Salter's "Ducks" vervangen als de leidende oceaangolfenergiecentrale. Elk van deze serpentine structuren is 130 m lang en bestaat uit een keten van vier segmenten, elk 3,5 m in diameter. Het maximumvermogen is 750 kW. De Pelamis' zijn ontworpen om te worden afgemeerd op diepten van 50 meter. In een golfpark kunnen 39 eenheden in drie rijen in de hoofdgolfrichting worden opgesteld. Zij zouden dan een oceaangebied van ongeveer 400 m x 2,5 km (1 km²) innemen. De effectieve doorsnede van één pelamis is 7 m (d.w.z. voor een goede golf onttrekt hij 100% van de energie die door 7 m stroomt). Het bedrijf beweert dat dergelijke golfparken 10 kW/m kunnen leveren.

[328] Ondiep water planten

Ongeveer 70% van de energie in oceaangolven gaat verloren door bodemwrijving naarmate de diepte afneemt van 100 m tot 15 m. De gemiddelde golfenergie per lengte-eenheid van de kustlijn in ondiep water wordt daardoor gereduceerd tot ongeveer 12%. De "oester", ontwikkeld door de Queen's University Belfast en Aquamarine Power Ltd [www-aquamarinepower.com], is een op de bodem gemonteerde

klep van ongeveer 12 m hoog, bedoeld voor ongeveer 12 m diep water, op plaatsen waar het gemiddelde invallende golfvermogen groter is dan 16 kW/m. Het maximumvermogen is 600 kW. Een enkele eenheid zou 270 kW kunnen leveren bij een golfhoogte van 3,5 m. Volgens de voorspelling zou een "oester" meer vermogen per machinemassa moeten leveren dan een pelamis.

"Oesters" zouden ook kunnen worden gebruikt om rechtstreeks zeewater te ontzilten door omgekeerde osmose. "De zoetwateroutput van een "oester" ontziltingsinstallatie ligt tussen 2000 en 6000 m³ piek per dag." Deze produktie, indien gebaseerd op de prestatiegegevens van de installatie van Jersey (die 8 kWh per m³ vergt), komt overeen met een elektrisch vermogen van 600-2000 kW.

G getijden-II

Bijlage G: Getijden

Vermogensdichtheid van getijdenpoelen

Om het vermogen van een kunstmatig getijdenbekken te schatten, moet men ervan uitgaan dat dit bekken bij vloed snel volloopt en bij eb ook weer snel leegloopt. De energieopwekking vindt plaats in beide stroomrichtingen, bij eb en bij vloed. De verandering in potentiële energie van het water om de zes uur is mgh , waarbij h de verandering in de hoogte van het zwaartepunt van het water is, die gelijk is aan de helft van het getijdenverschil (het getijdenverschil is het verschil in hoogte van het water bij eb en bij vloed, zie fig.G.1). De massa per oppervlakte-eenheid die het getijdenbekken bevat is $\rho \times (2h)$, waarbij ρ de dichtheid van het water aangeeft (1000 kg/m^3). Het vermogen per oppervlakte-eenheid van het getijdenbekken is dus

$$\frac{2\rho h g h}{6 \text{ uur}}$$

uitgaande van perfect efficiënte generatoren. Uitgaande van $h = 2 \text{ m}$ (d.w.z. een getijdenverschil van 4 m), levert de formule een vermogensdichtheid van de getijdenpoel op van $3,6 \text{ W/m}^2$. Met een reëel generatorrendement van 90% verkrijgen we een vermogen per oppervlakte-eenheid in het getijdenbekken $\approx 3 \text{ W/m}^2$.

Om 1 GW gemiddeld vermogen op te wekken, hebben we een getijdenbekken van ongeveer 300 km^2 nodig. Een cirkelvormig bekken met een diameter van 20 km zou voldoende zijn. (Ter vergelijking: het estuarium van de Severn achter de voorgestelde stuw is ongeveer 550 km^2 groot, en het gebied in "The Wash" is meer dan 400 km^2).

Als een getijdenbekken dus slechts in één stroomrichting stroom produceert, levert het de helft van dat vermogen. De gemiddelde vermogensdichtheid van het getijdenstuwmeer van La Rance, waar het gemiddelde getijdenverschil $10,9 \text{ m}$ bedraagt, bedroeg gedurende tientallen jaren $2,7 \text{ W/m}^2$ (blz. 100).

De natuurlijke rijkdommen van de getijden

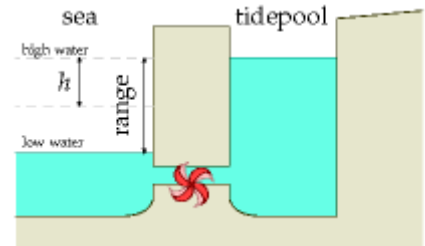


Fig.G.1: Een getijdenbekken in doorsnede. Het bassin was gevuld bij vloed, de foto toont eb. We laten het water uit het bassin stromen en door een stroomgenerator lopen, waarbij de potentiële energie wordt omgezet in elektriciteit.

De getijden rond Engeland zijn echte vloedgolven. (Tsunami's, soms "vloedgolven" genoemd, hebben niets te maken met getijden: zij worden teweeggebracht door onderzeese aardverschuivingen of zeebevingen). De positie van het hoogtij (de top van de vloedgolf) beweegt veel sneller dan de getijdenstroom - ongeveer 100 zeemijl per uur, terwijl het water zich slechts met ongeveer één zeemijl per uur verplaatst.

De energie die wij uit deze getijden kunnen halen met bekkens of getijdenparken kan nooit meer zijn dan de energie van de Atlantische getijdengolven. Wij kunnen de energie van deze grote Atlantische vloedgolven op dezelfde manier bepalen als voor normale door de wind gegenereerde golven. In het volgende hoofdstuk wordt een standaardmodel beschreven voor de energie in een binnenkomende golf bij een waterdiepte d die ondiep is vergeleken met de golflengte (Fig.G.2). Het vermogen per lengte-eenheid van de top van een getijdengolf in ondiep water is

$$\rho g^{3/2} \sqrt{d h^2 / 2} . \quad (\text{G.1})$$

[330] Tabel G.3 toont het vermogen per lengte-eenheid voor enkele plausibele waarden. Voor $d = 100$ m en $h = 1$ of 2 m bedraagt het vermogen per lengte-eenheid van het golffront respectievelijk 150 kW/m en 600 kW/m. Dit zijn indrukwekkende cijfers wanneer men ze vergelijkt met het natuurlijke vermogen van een normale Atlantische oceaangolf van 40 kW/m (aanhangel F). Atlantische golven en Atlantische getijden hebben vergelijkbare amplitudes (ongeveer 1 m), maar de natuurlijke kracht in getijden is ongeveer 10 keer groter dan in normale door de wind gegenereerde golven.

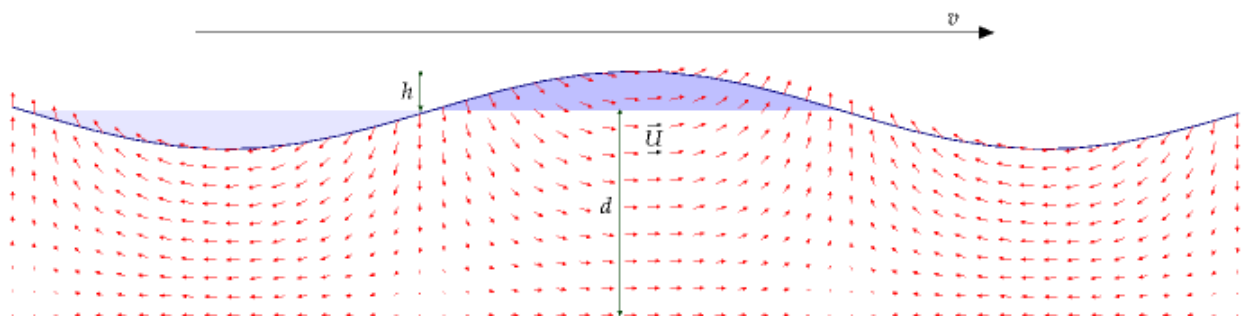


Fig.G.2: Een golf in ondiep water. Zoals de golf in diep water, draagt hij energie in twee vormen: Potentiële energie in verband met de opwaartse beweging van het water van het lichtgekleurde dal naar de donkergekleurde top; en kinetische energie van alle kleine bewegingen van het water, zoals aangegeven door de kleine rode pijlen. De snelheid van de golf die van links naar rechts gaat, wordt aangegeven door de veel grotere pijl bovenaan. Voor vloedgolven kan een typische waterdiepte 100 m bedragen, de snelheid van de top 30 m/s, de verticale amplitude aan het oppervlak 1 of 2 m, en de amplitude van de watersnelheden 0,3 of 0,6 m/s.

Taylor (1920) werkte een meer gedetailleerd model van de getijdenkracht uit dat ook rekening hield met belangrijke details zoals de Corioliskracht (een effect van

de rotatie van de aarde), het bestaan van tegendraadse getijdengolven, en het directe effect van de maan op de energiestroom in de Ierse Zee. Sindsdien hebben experimentele metingen en computermodellen deze studies van Taylor bevestigd en uitgebreid. Flather (1976) stelde een gedetailleerd numeriek model op van de getijden van de maan door het continentaal plat rond Engeland in ongeveer 1000 vierkante individuele cellen te verdelen. Flather schatte de totale gemiddelde energie in deze regio op 215 GW. Volgens dit model stroomt er 180 GW naar het gebied tussen Frankrijk en Ierland. Van Noord-Ierland tot rond Shetland, is het inkomend vermogen 49 GW. Tussen Shetland en Noorwegen bedraagt het nettoverlies 5 GW. Zoals blijkt uit Fig.G.4, hebben Cartwright et al. (1980) experimenteel de gemiddelde vermogensstromen bepaald op 60 GW tussen Malin Head (Ierland) en Florø (Noorwegen) en 190 GW tussen Valentia (Ierland) en de Bretonse kust bij Ouessant. Zij stelden vast dat de stroom in de Ierse Zee 45 GW bedraagt, en de stroom in de Noordzee door het Nauw van Calais 16,7 GW.

Tabel.G.3: *Vermogensfluxen (vermogen per lengte-eenheid van het golffront) voor waterdiepte 100 m.*

h (m)	$\rho g^{3/2} \sqrt{dh^2/2}$ kW/m
0,9	125
1,0	155
1,2	220
1,5	345
1,75	445
2,0	600
2,25	780

[331] De kracht van vloedgolven

In dit deel, dat veilig kan worden overgeslagen, komen meer details aan de orde achter de formule voor getijdenenergie die in het vorige deel is gebruikt. Ik wil dieper ingaan op dit model van getijdenenergie, omdat de meeste officiële ramingen van de Engelse getijdenvoorraden gebaseerd zijn op een model dat mijns inziens gebreken vertoont.

Fig.G.2. toont een model voor getijgolven die door relatief ondiep water gaan. Het model is bijvoorbeeld voor getijdengolven die langs het Kanaal van Engeland of de Noordzee lopen. Het is belangrijk onderscheid te maken tussen de snelheid U waarmee het water zelf stroomt (ongeveer één zeemijl per uur) en de snelheid v waarmee de vloedgolf loopt (ongeveer 100 of 200 zeemijl per uur).

De diepte van het water is d . Crests en troggen komen van links, opgewekt door de 12-uurs getijden van de oceaan. Ze bewegen met de snelheid

$$v = \sqrt{gd} \quad . \quad (G.2)$$

Wij nemen aan dat de golflengte veel groter is dan de waterdiepte, en wij verwaar-

lozen details zoals de Corioliskracht of de dichtheidsfluctuaties in het water. We noemen de verticale amplitude van het getij h . Onder de standaard aanname van bijna wervelvrije stroming is de horizontale watersnelheid bijna onafhankelijk van de diepte. Deze horizontale snelheid U is evenredig met de afbuiging aan het oppervlak en kan worden afgeleid uit het behoud van massa:

$$U = vh/d. \quad (G.3)$$

Naarmate de diepte toeneemt, neemt de golfsnelheid v af (vergelijking (G.2)). Voor de volgende discussie ga ik ervan uit dat de diepte constant is. Energie stroomt van links naar rechts met een bepaalde snelheid. Hoe kan dit totale getijdenvermogen worden geschat? En wat is het maximale vermogen dat kan worden onttrokken?

Eén benadering bestaat erin een dwarsdoorsnede te nemen, de gemiddelde kinetische energiestroom door dat gebied te schatten en vervolgens aan te nemen dat deze grootte het extraheerbare vermogen bevat. Deze energiestroommethode werd door Black and Veatch gebruikt om de Engelse hulpbronnen te ramen. In ons model kunnen we het totale vermogen op een andere manier bepalen. Wij zullen vaststellen dat de kinetische energiestroommethode een veel te klein vermogen geeft.



Fig. G.4: Gemiddeld getijdenvermogen volgens metingen van Cartwright et al. (1980).

De piekflux van kinetische energie in een doorsnedegebied A is

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3, \quad (G.4)$$

(Dit is de kinetische-energiestroomformule die we ook in aanhangsel B hebben gebruikt). Het totale optredende vermogen is niet gelijk aan de kinetische energiestroom. De totale geleiding die in een golf optreedt is een standaardberekening uit het tekstboek; één manier om deze te bepalen is de energie in een hele golf te bepalen en deze dan te delen door de periode. [332] De totale energie van een golf is de som van de potentiële energie en de kinetische energie. Kinetische en potentiële energie zijn inderdaad gelijk (Dit is een standaard eigenschap van bijna alle oscillerende systemen, of het nu gaat om massa's op veren of kinderen op schommels). Om de totale energie te bepalen is het dus voldoende één van deze twee delen - de potentiële energie van een golflengte of de kinetische energie van een golflengte - te berekenen en deze vervolgens te verdubbelen. De potentiële energie van een golf (per golflengte en per lengte-eenheid van een golfvront) kan door integratie als volgt

worden bepaald.

$$\frac{1}{4} \rho g h^2 \lambda . \quad (\text{G.5})$$

Door verdubbeling en deling door de periode geeft dit het werkelijke totale vermogen van de modelgolf (getij in ondiep water)

$$\text{Vermogen} = \frac{1}{2} (\rho g h^2 \lambda) \times w / T = \frac{1}{2} \rho g h^2 v \times w , \quad (\text{G.6})$$

Waarbij w de breedte van het golffront is. Met de substitutie $v = g d$ volgt.

$$\text{Vermogen} = \rho g h^2 \sqrt{g d} \times w / 2 = \rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 \times w / 2 . \quad (\text{G.7})$$

Laten we dit vermogen vergelijken met de flux van kinetische energie KBV. Het is duidelijk dat beide uitdrukkingen verschillend schalen met amplitude h . Als we de omrekeningsformule voor de amplitude, Eq. (G.3), de kam-snelheid Eq. (G.2), en $A = w d$ gebruiken, kunnen we de kinetische energieflex herschrijven als

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3 = \frac{1}{2} \rho w d (v h / d)^3 = \rho (g^{3/2} / \sqrt{d}) h^3 \times w / 2 . \quad (\text{G.8})$$

Zo suggereert de kinetische-energie-fluxmethode dat het totale vermogen van de golf schommelt met de derde macht van de amplitude (vergelijking (G.8)); maar de juiste formule toont aan dat het vermogen schommelt met het kwadraat van de amplitude (vergelijking G.7)).

De relatie is

$$\frac{K_{BV}}{\text{Leistung}} = \frac{\rho w (g^{3/2} / \sqrt{d}) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} w} = \frac{h}{d} . \quad (\text{G.9})$$

Aangezien h gewoonlijk veel kleiner is dan d (h is ongeveer 1 m of 2 m, maar d is daarentegen 100 m of 10 m), zijn ramingen van de krachtbronnen op basis van de flux van kinetische energie waarschijnlijk veel te klein, althans in gevallen waarin het getijdengolfmodel van toepassing is in ondiep water.

Voorts wordt er in modellen die op de kinetische energieflex zijn gebaseerd, ten onrechte van uitgegaan dat de kracht van springtij (de hoogste getijden) acht keer zo groot is als die van doottij (de laagste getijden), met een veronderstelde amplitude-verhouding van springtij tot doottij van 2:1. Het is echter juist dat de totale kracht van een lopende golf schommelt met het kwadraat van de amplitude, hetgeen resulteert in een vermogensverhouding van inkomende springtij tot doottij van vier op één.

Effecten van de gradatie van de zeebodem en de Corioliskracht.

Indien de diepte d geleidelijk afneemt en de breedte constant blijft, zodat de weerkaatsing en absorptie van het inkomende vermogen minimaal zijn, blijft het vermogen van de golf constant. [333] Dit betekent dat $\sqrt{d}h^2$ een constante is, waaruit we afleiden dat het getijdebereik met de diepte schaalt als $h \sim 1/d^{1/4}$. Dit is een ruw model. Een verwaarloosd detail is het Coriolis-effect. De Corioliskracht duwt de getijdenruggen en -dalen naar rechts in de rijrichting - in het kanaal aan de Franse kant is het getij bijvoorbeeld hoger en de eb lager. Veronachtzaming van dit effect leidt tot een zekere fout in de ramingen.

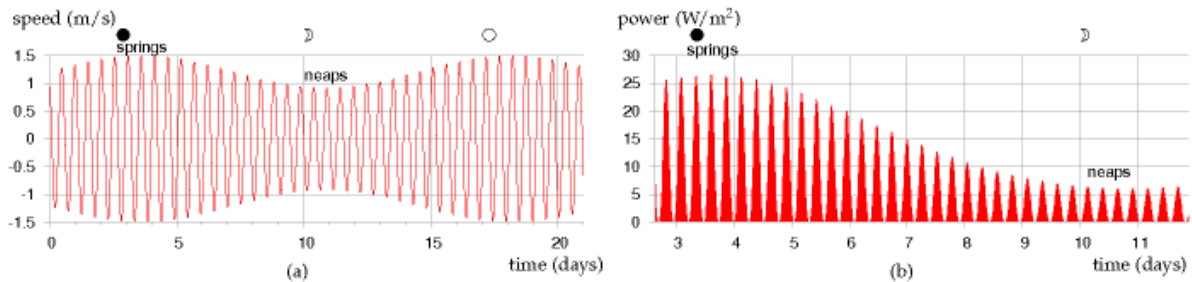


Fig.G.5: (a) Getijdenstroming over een periode van 21 dagen op een plaats waar de maximale stroming 2,9 knopen (1,5 m/s) bedraagt bij springtij en 1,8 knopen (0,9 m/s) bij doortij. (b) Het vermogen per eenheid zeebodemoppervlak gedurende een periode van negen dagen van springtij tot nippentij. Het vermogen heeft vier pieken per dag, met maximaal 27 W/m². Het gemiddelde vermogen van het getijdenpark is 6,4 W/m².

Vermogensdichtheid van getijdenstroomparken

Stel je voor dat we onderwater windmolens plaatsen op de oceaانبodem. De waterstroom zal de windmolens aandrijven. Omdat de dichtheid van water ongeveer 1000 keer groter is dan die van lucht, is het vermogen ook 1000 keer groter dan wind met dezelfde snelheid.

Hoeveel stroom kunnen getijdenparken winnen? Dat hangt er sterk van af of de bijdragen van de aangrenzende gebieden al dan niet opgeteld worden. Voor wind is deze additiviteitshypothese vrij goed gewaarborgd: Zolang de windmolens ver genoeg uit elkaar staan, is de output van tien naburige windparken de som van wat elk park zou opleveren als het alleen stond.

Geldt dit ook voor getijdenkwekerijen? Of werken onderzeese windmolens op verschillende manieren in op elkaars stroomwinning? Ik denk niet dat het antwoord hierop in zijn algemeenheid bekend is. Maar wij kunnen twee alternatieve veronderstellingen maken en modelsituaties bepalen waarin elke veronderstelling waar is. De "getijden zijn als de wind"-aannname zegt dat je getidenturbines overal op de oceaانبodem kunt plaatsen, ongeveer 5 diameters uit elkaar, en dat ze elkaar niet zullen hinderen, hoeveel het er ook zijn.

De "single row"-aanname houdt in dat het maximale vermogen dat uit een gebied kan worden gehaald, het vermogen is dat wordt geproduceerd door een rij turbines die dwars op de stroom zijn geplaatst. Een situatie waarin dit het geval is, is een stuwdam, wanneer het water van het opstuwingsgebied door één enkele, goed gedi-mensioneerde turbine stroomt. Er is dan geen mogelijkheid om er meer turbines achter te zetten. Je kunt niet 100 keer meer stroom opwekken door er stroomaf-waarts nog eens 99 turbines bij te plaatsen. De kracht wordt onttrokken in de eerste, er is niets over voor de anderen. De "slechts één rij"-aanname geldt wanneer men het winbare vermogen berekent op een punt waar water door een nauwe verbinding tussen een bijna stilstaand water van een bepaalde hoogte in een dieper gelegen bekken stroomt. (Dit geval wordt geanalyseerd in Garrett en Cummins (2005, 2007)).

Mijn persoonlijke gok is dat op veel plaatsen in Engeland de veronderstelling "ge-tijden zijn als de wind" een goede benadering is. [334] Misschien hebben sommige plaatsen het kenmerk van een smalle stroom. Op deze plaatsen zou de "als de wind"-aanname een overschatting van het potentieel zijn.

Laten we aannemen dat de regels voor het ontwerpen van een getijdenmolenpark vergelijkbaar zijn met die voor een windmolenpark, en dat het rendement van getij-denmolens vergelijkbaar is met dat van de beste windmolens, d.w.z. Ongeveer ½. We kunnen dan de formule voor het vermogen van een windmolenpark (per land-eenheid) van blz. [283] (Gl. (B.8)) overnemen. Het vermogen per oppervlakte-een-heid van de zeebodem is dan:

$$\frac{\text{Vermogen per turbine}}{\text{Oppervlakte per turbine}} = \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3 . \quad (\text{G.10})$$

Tabel G.6 geeft het vermogen van getijdenparken bij verschillende getijdenstromen volgens deze formule.

Tabel G.6: *Vermogensdichtheid van getijdenpar-ken (in watt per vierkante meter zeebodem) als functie van stroomsnelheid U. (1 knoop = 1 zee-mijl per uur = 0,514 m/s.) De vermogensdicht-*

heid wordt berekend als . $\frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3$ (=G.10)

<i>U</i> (m/s) (knoep)		Getijden- energie W/m ²
0.5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Wat zijn typische getijdenstromingen? De tabellen bevatten gewoonlijk de stromin-gen die horen bij het grootste getijdenverschil (springtij) en het kleinste getijden-verschil (doodtij). Springtij treedt op kort na elke volle of nieuwe maan, en doottij treedt op tijdens maansikkels na het eerste of derde kwart van de maancyclus. De output van een getijdenpark zou gedurende de dag op voorspelbare wijze fluctue-

ren. **Fig.G.5** illustreert de vermogensdichtheid van een getijdenpark met een maximale getijdenstroom van 1,5 m/s. Het gemiddelde vermogen van deze boerderij zou 6,4 W/m² zijn. Er zijn veel plaatsen op de Britse eilanden waar 6 W/m² of meer haalbaar zou zijn. Deze waarde is vergelijkbaar met onze ramingen voor windmolenparken (2-3 W/m²) en zonneparken (5-10 W/m²).

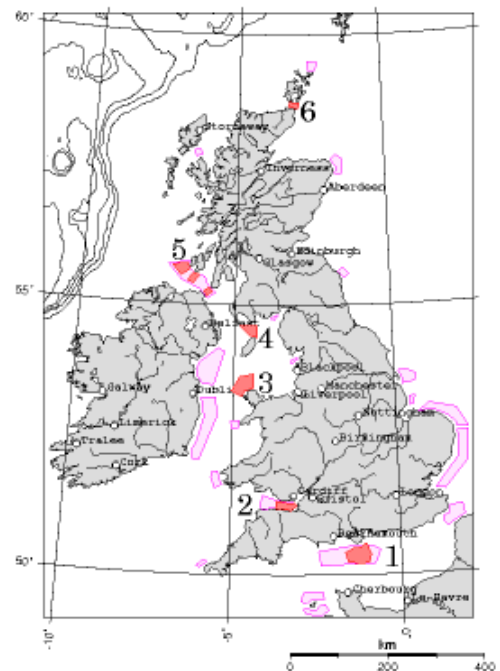
Wij gebruiken de "getijden zijn als wind"-theorie om een schatting te maken van het vermogen dat kan worden gewonnen door getijdenparken in veelbelovende regio's rond de Britse eilanden. Bij wijze van consistentiecontrole berekenen wij ook het totale getijdenvermogen dat door elk van deze regio's stroomt, op basis van de theorie van de "kracht van getijdengolven", om er zeker van te zijn dat onze raming van het getijdenpark niet groter is dan het totale beschikbare vermogen. De belangrijkste gebieden met hoge getijdenstromingen zijn aangegeven in **Fig.G.7**.

Ik heb de piekstromen voor veelbelovende zes regio's geschat met behulp van gegevens uit "Reed's Nautical Almanac" (deze gegevens kunnen gemakkelijk voor 30% fout zijn). Heb ik de gebieden van de ene of de andere regio overschat of onderschat? Ik heb de zeebodem niet bestudeerd - het is heel goed mogelijk dat die op de een of andere manier ongeschikt is, te diep, te ondiep, of te ingewikkeld om te bewerken.

[335] Fig.G.7: Regio's rond de Britse eilanden waar de piek van de getijdenflux groter is dan hoger is dan 1 m/s. De zes donker gearceerde gebieden zijn opgenomen in tabel G.8:

1. Kanaal van Engeland (ten zuiden van het Isle of Wight)
2. het Kanaal van Bristol
3. ten noorden van Anglesey
4. ten noorden van het eiland Man
5. tussen Noord-Ierland, Mull of Kintyre en Islay; en
6. de Pentland Firth (tussen Orkney en Schotland) en tussen de Orkney-eilanden.

Bovendien zijn er geduchte stromingen rond de Kanaaleilanden, maar die vallen niet onder Engels bestuur. Andere veelbelovende gebieden zijn te vinden in de Noordzee, van de Theems (Londen) tot The Wash (Kings Lynn). Contouren geven waterdieptes van meer dan 100 m aan. De getijdengegevens zijn afkomstig uit Reed's Nautical Almanac en de DTI Atlas of UK Marine Renewable Energy Resources (2004).



Met al deze onzekerheden kwam ik uit op een schatting voor het totale vermogen van getijdenparken van 9 kWh/d per persoon. Dat komt overeen met 9% van het natuurlijke binnenkomende golfvermogen dat ik op blz. [095] noemde, 100 kWh per dag per persoon. (Het vermogen van 1,1 kWh/d/p in het Bristolkanaal, regio 2, zou kunnen concurreren met de stuwdam in de Severn; dat

hangt af van de vraag of het getijdenpark iets toevoegt aan de natuurlijke wrijving die door het kanaal wordt gegenereerd, of deze vervangt).

Region	U knopen		verm. dichth. (W/m ²)	opp. vlak (km ²)	gemiddeld vermogen (kWh/d/p)	natuurlijk vermogen			
	N	S				d (m)	w (km)	N (kWh/d/p)	S (kWh/d/p)
1	1.7	3.1	7	400	1.1	30	30	2.3	7.8
2	1.8	3.2	8	350	1.1	30	17	1.5	4.7
3	1.3	2.3	2.9	1000	1.2	50	30	3.0	9.3
4	1.7	3.4	9	400	1.4	30	20	1.5	6.3
5	1.7	3.1	7	300	0.8	40	10	1.2	4.0
6	5.0	9.0	170	50	3.5	70	10	24	78
Samen	9								

(a)

(b)

Tabel G.8: a) Schatting van het getijdenvermogen, ervan uitgaande dat getijdenparken op windparken lijken. De vermogensdichtheid is het gemiddelde vermogen per oppervlakte-eenheid van de zeebodem. De zes bovengenoemde regio's zijn uitgezet in Fig.G.7. N=nip getij, S=lente getij. b) Ter vergelijking, schatting van het inkomend natuurlijk vermogen met behulp van vergelijking (G.1) (blz. 331).

v (m/s)	v knopen	Wrijvingsvermogen dichtheid (W/m ²)		Vermogensdichtheid Getijdenpark (W/m ²)
		$R_l = 0.01$	$R_l = 0.003$	
0,5	1	1,25	0,4	1
1	2	10	3	8
2	4	80	24	60
3	6	270	80	200
4	8	640	190	500
5	10	1250	373	1000

Tabel G.9: Wrijvingsvermogensdichtheid $P1\rho U^3$ (in watt per vierkante meter zeebodem) als functie van de riviersnelheid, uitgaande van $R_l=0,01$ of $0,003$. Flather (1976) gebruikt $R_l=0,0025-0,003$; Taylor (1920) gebruikt $0,002$. (1 knoop = 1 zeemijl per uur = $0,514$ m/s.) In de laatste kolom staat het vermogen van het getijdenpark zoals geraamd in tabel G.6. Voor verdere lectuur, zie Kowalik (2004), Sleath (1984).

Raming van de getijdenvoorraden op basis van bodemwrijving

Een andere manier om het beschikbare vermogen uit getijden af te leiden is te berekenen hoeveel vermogen er reeds verloren gaat door wrijving op de zeebodem. Een mantel van turbines, vlak boven de zeebodem gemonteerd, zou als bodemsubstituut kunnen fungeren en ongeveer dezelfde weerstand tegen stromend water bieden als de normale bodem, zonder de getijdenstromingen noemenswaardig te beïnvloeden.

Dus welke kracht gaat er verloren in de grondwrijving? Helaas bestaat er geen consistent model voor bodemwrijving. De wrijving hangt af van de ruwheid van de zeebodem en het materiaal waarvan deze is gemaakt - en zelfs indien deze parameters bekend zijn, is het niet duidelijk welke formule moet worden gebruikt. Een algemeen gebruikt model zegt dat de grootte van de mechanische schuifspanning (kracht per oppervlakte) wordt gegeven door $R_l\rho U^2$, waarbij U de gemiddelde stroomsnelheid is en R_l een dimensieloze grootheid die schuifwrijvingscoëfficiënt wordt genoemd. We kunnen het vermogensverlies schatten door de afschuifkracht te vermenigvuldigen met de snelheid. **Tabel G.9** toont het vermogen dat verloren gaat door wrijving, uitgaande van $R_l = 0,01$ of $R_l = 0,003$. Als de waarde van de afschuifwrijvingscoëfficiënt in dit bereik ligt, krijgen we vrij vergelijkbare waarden

voor het wrijvingsvermogen als in de bovenstaande ramingen voor getijdenparken. Dit is goed nieuws omdat het suggereert dat een woud van onderwater windmolens, elk 5 diameters uit elkaar op de oceaانبodem, de stromingen niet ingrijpend zal veranderen. Natuurlijke wrijving heeft al een effect van een vergelijkbare grootte.

Getijdenpoelen met pompen

"De pomptruc" verhoogt kunstmatig de amplitude van de getijden in een bekken, waardoor het vermogen dat kan worden bereikt, wordt vergroot. De energie die wordt gebruikt om bij vloed extra water naar binnen te pompen, wordt met rente teruggewonnen wanneer hetzelfde water bij eb naar buiten wordt gelaten. Op dezelfde manier kan bij eb extra water uit het bekken worden gepompt en er bij vloed weer in stromen. De PumpTrick wordt soms gebruikt in La Rance en verhoogt het netto vermogen met 10% (Wilson and Balls, 1990). Laten we eens kijken naar de theoretische grenzen van deze technologie. Ik ga ervan uit dat de generatoren een rendement hebben van $\varepsilon_G = 0,9$ en de pompen $\varepsilon_P = 0,85$. Stel dat het getijdenverschil 2 uur is. Om het eenvoudig te houden, ga ik ervan uit dat de prijzen om elektriciteit te kopen en te verkopen gelijk en constant zijn. De optimale extra pomphoogte b waartoe het bekken boven het hoogwaterpeil moet worden volgepompt, wordt dan gegeven door (marginale kosten van extra pompen = marginale baten van extra water)

$$b \varepsilon_P = (b + 2h)$$

Met de cyclusefficiëntie $\varepsilon = \varepsilon_G \varepsilon_P$ krijgen we.

$$b = 2h \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} .$$

Bijvoorbeeld, met een getijverschil van $2h = 4$ m en een cyclusefficiëntie van $\varepsilon = 76\%$, is de optimale extra hoogte $b = 13$ m . Dit is de maximale extra hoogte tot waar pompen economisch rendabel is bij constante elektriciteitsprijzen.

Stel dat de omgekeerde truc werd toegepast op eb. (Dit vereist dat het bekken een verticale verlenging van 30 m heeft!) Dan is het geleverde vermogen per oppervlakte-eenheid

$$\left(\frac{1}{2} \rho g \varepsilon_G (b + 2h)^2 - \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\varepsilon_P} b^2 \right) / T ,$$

waarbij T de tijd is tussen hoogtij en laagtij. We kunnen dit uitdrukken als de maximaal mogelijke vermogensdichtheid zonder pompen, $\varepsilon_G / 2$, vermeerderd met de pompfactor

$$\left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right) ,$$

wat ongeveer een factor 4 is. **Tabel.G.10** geeft de theoretische vermogensdichtheden die met pompen kunnen worden bereikt. [337] Helaas zal de pomptruc slechts zelden volledig worden benut vanwege de economische aspecten van de bouw van een bekken: voor een volledige benutting van de pomptruc is een bekken nodig dat ongeveer vier keer zo hoog is als het getijdenverschil, waardoor het opgewekte vermogen vier keer zo groot wordt. Maar de hoeveelheid materiaal die nodig is om een dam van hoogte H te bouwen, schaalt met H^2 , zodat de kosten om een muur te bouwen die 4 keer zo hoog is, meer dan 4 keer zo hoog zijn. Extra middelen kunnen waarschijnlijk beter worden besteed aan het horizontaal dan verticaal vergroten van het bekken.

Getij-amplitude (halve slag) h (m)	Optimaal Transporthoogte b (m)	Vermogen met pompen (W/m ²)	Vermogen zonder pompen (W/m ²)
1,0	6,5	3,5	0,8
2,0	13	14	3,3
3,0	20	31	7,4
4,0	26	56	13

Tabel G.10: Theoretische vermogensdichtheid van de getijdekracht met behulp van de PumpTrick wanneer er geen beperkingen zijn vanuit de hoogte van het bekken.

De pomptruc kan echter nog steeds zonder extra kosten worden gebruikt op elke dag waarop het natuurlijke getijverschil kleiner is dan de maximale hoogte van het zwembad: het waterpeil bij vloed kan worden opgepompt tot het maximumpeil. **Tabel G.11** geeft de prestaties wanneer slechts één hoogte h wordt gepompt ($b = h$), d.w.z. dat de hoogte in het bekken slechts tweemaal de externe getijhoogte bedraagt. Verdubbeling van de hoogte is gemakkelijk bij doottij, omdat doottij meestal half zo groot is als springtij. Door de bekkens bij doottij op te pompen tot het niveau van springtij wordt het vermogen bij doottij ruwweg verdubbeld ten opzichte van ongepompt bedrijf. Een systeem met pompen zou dus tweewekelijkse variaties vertonen met slechts een factor 2 in plaats van een factor 4.

Getij-amplitude (halve slag) h (m)	Pomphoogte b (m)	Vermogen met pompen (W/m ²)	Vermogen zonder pompen (W/m ²)
1,0	1,0	1,6	0,8
2,0	2,0	6,3	3,3
3,0	3,0	14	7,4
4,0	4,0	25	13

Tabel.G.11: Vermogensdichtheid geopend door de pomptruc wanneer de hulpopvoerhoogte even hoog is als het getijdeverschil. Aan deze veronderstelling wordt bijvoorbeeld voldaan bij doottij, wanneer door middel van pompen het getijdenverschil wordt opgetrokken tot de omvang van het natuurlijke springtij.

Hoe maak je een "continu draaiende" getijdencentrale met twee bekkens

Hier is een leuk idee: neem twee bassins, waarvan één de "volle" is en één de "lege"; bij elke vloed wordt de "volle" bijgevuld; bij elke eb wordt de "lege" hele-

maal leeggegooid. Het vullen en legen kan passief gebeuren door middel van sluisen, of (aanvullend) door pompen met de hierboven genoemde PumpTrick. Wanneer stroom nodig is, laat men water stromen van het "volle" bekken naar het "lege" of (nog beter voor de stroomopbrengst) van het ene bekken naar de open zee. De kapitaalkosten van een oplossing met twee bassins (een zogenaamde getijdenlagune) zullen waarschijnlijk hoger liggen omdat extra barrièremuren nodig zijn, maar het grote voordeel is dat de stroom op elk moment beschikbaar is, zodat de centrale de stroomvraag kan volgen.

Een systeem met twee bassins zou ook kunnen worden geëxploiteerd als een pomp-accumulatiecentrale.

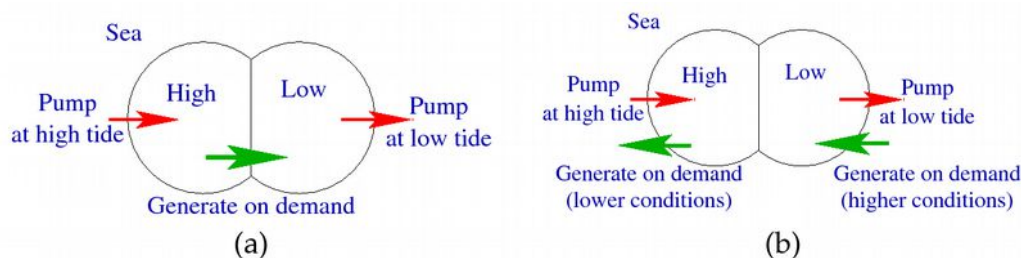


Fig.G.12: *Verskillende toepassingen van de getijdenpomp truc. De twee bekkens (lagunes) liggen op zeeniveau. a) Een eenvoudige manier om twee bekkens te gebruiken is het ene aan te duiden als het "volle" bekken en het andere als het "lege" bekken; wanneer de omringende zee dicht bij vloed is, laat men water in het "volle" bekken stromen, of men pompt het actief op (met behulp van energie uit een andere bron); op dezelfde manier laat men bij eb het "lege" bekken leeglopen, hetzij passief, hetzij door te pompen. b) Een andere regeling, die nog meer vermogen per bekkengebied zou kunnen opleveren, voorziet in geen waterstroom tussen de twee bekkens. Terwijl het ene bassin net vol of leeg wordt gepompt, kan het andere gestaag stroom leveren aan het net als dat nodig is. Pompkracht zou ook kunnen worden geleverd door op korte termijn fluctuerende bronnen zoals wind of extra bronnen op het net (zoals kerncentrales), of door de andere helft van het bekkensysteem, waarbij stroom uit het ene bekken wordt gebruikt om het andere bekken vol of leeg te pompen.*

Wij kunnen de in het "lege" bekken opgewekte stroom gebruiken om bij vloed extra water in het "volle" bekken te pompen, en op dezelfde wijze de stroom uit het "volle" bekken gebruiken om bij eb het waterpeil in het "lege" bekken te doen zakken. Dit "pompen op eigen kracht" zou kunnen worden gebruikt om de capaciteit van de centrale te vergroten zonder stroom te hoeven afnemen van het net. [338] Het is een prettige eigenschap van deze oplossing met twee bassins dat het optimale tijdstip om water in het "volle" bassin te pompen net bij vloed is, wat ook het optimale tijdstip is om stroom te winnen met het "lege" bassin. Omgekeerd is eb het beste moment om de "lege" poel leeg te pompen en dus het perfecte moment om stroom te onttrekken aan de "volle" poel. In een eenvoudige simulatie kon ik aantonen dat een systeem met twee bekkens op een plaats met een natuurlijk getijdenver-

schil van 4 m een continu vermogen van 4,5 W/m² kan leveren (MacKay, 2007a). Dit is 50% hoger dan het maximale gemiddelde vermogen dat haalbaar is uit een gewoon getijdenbekken op dezelfde plaats (3 W/m²). Bovendien zou de gestage stroomopbrengst van het systeem met twee bassins waardevoller zijn dan de intermitterende en minder flexibele stroomopwekking van conventionele getijdenbassins.

Opmerkingen

Pagina	
329	Generator rendement van 90% 311 Rendement van 90%... Turbines bereiken een rendement van ongeveer 90% bij een opvoerdiameter van 3,7 m of meer. Baker et al (2006).
337	Een "altijd draaiende" getijdencentrale met behulp van twee bekkens – 320 Het verkrijgen van "altijd draaiende" getijdenenergie door het gebruik van twee bekkens. Er is een getijdenlagune-energiecentrale met twee bekkens in Haishan, Maoyan Island, China. Een enkele generator tussen de twee bekkens (opstelling als in fig.G.12(a)) levert een continu vermogen van gemiddeld 39 kW [2bqapk].
	Verdere literatuur: Shaw en Watson (2003b); Blunden en Bahaj (2007); Charlier (2003a,b). Voor bodemwrijving en de afhankelijkheid van de flux van de diepte, zie Sleath (1984). Voor uitgebreidere ramingen van de Engelse getijdenvoorraden, zie MacKay (2007b); over getijdenleg MacKay (2007a).

H dingen-II

Bijlage H: Voorwerpen voor dagelijks gebruik II

Ingevoerde energie

Dieter Helm en zijn collega's hebben de voetafdruk van de invoer uit een land X geraamd op basis van hun monetaire waarde, met gebruikmaking van de CO₂-intensiteit van de economie in land X (dat is de verhouding tussen de CO₂-uitstoot en het bruto nationaal product). Zij kwamen tot de conclusie dat de CO₂-impact van de grijze goederen (d.w.z. de energie die nodig is voor de fabricage en het vervoer) die in Engeland worden ingevoerd (en die op zichzelf moeten worden opgeteld bij de officiële CO₂-voetafdruk van Engeland van 11 ton CO₂e per jaar



Fig.H.1: Continugieten van staal in een Koreaanse ijzer- en staalfabriek

per persoon) ongeveer 16 ton CO₂e per jaar per persoon bedraagt. In een meer gedetailleerde vervolgstudie van DEFRA wordt deze ingevoerde "grijze CO₂" op een kleiner maar nog steeds significant cijfer geraamd: ongeveer 6,2 ton CO₂e per jaar per persoon. In energie-eenheden komt 6 ton CO₂e overeen met ongeveer 60 kWh/d. Laten wij nu trachten deze conclusies te reproduceren door gebruik te maken van het gewicht van de invoer in plaats van monetaire waarden.

Fig.H.2 toont de invoer van Engeland in 2006 op drie verschillende manieren: links is de totale waarde van de invoer uitgesplitst naar land van oorsprong. In het midden is hetzelfde financiële volume uitgesplitst naar goederengroep volgens de indeling van de Inland Revenue. Rechts de maritieme invoer naar gewicht, uitgesplitst volgens de classificatie van het Department of Transportation, dat geen onderscheid maakt tussen lederwaren en tabak, maar naar gewicht van de goederen, vast of vloeibaar, containervracht of bulk.

De energiekosten van ingevoerde brandstoffen (rechtsboven) zijn reeds verrekend in de standaard Engelse energierekeningen; de energiekosten van alle andere goederen zijn dat niet. Voor de meeste materialen is de grijze energie per gewichtseenheid groter dan of gelijk aan 10 kWh per kg - hetzelfde als de energie per gewichtseenheid van fossiele brandstoffen. Dit geldt voor alle metalen en legeringen, alle polymeren en composieten, de meeste papierproducten en keramische materialen. Uitzonderingen zijn grondstoffen zoals ertsen, poreus keramiek zoals beton, bakstenen of porselein, waarvan de energiekosten ongeveer 10 keer lager liggen; hout en

rubber, en glas, waarvan de energiekosten iets minder dan 10 kWh per kg bedragen.
[r22oz]
[340]

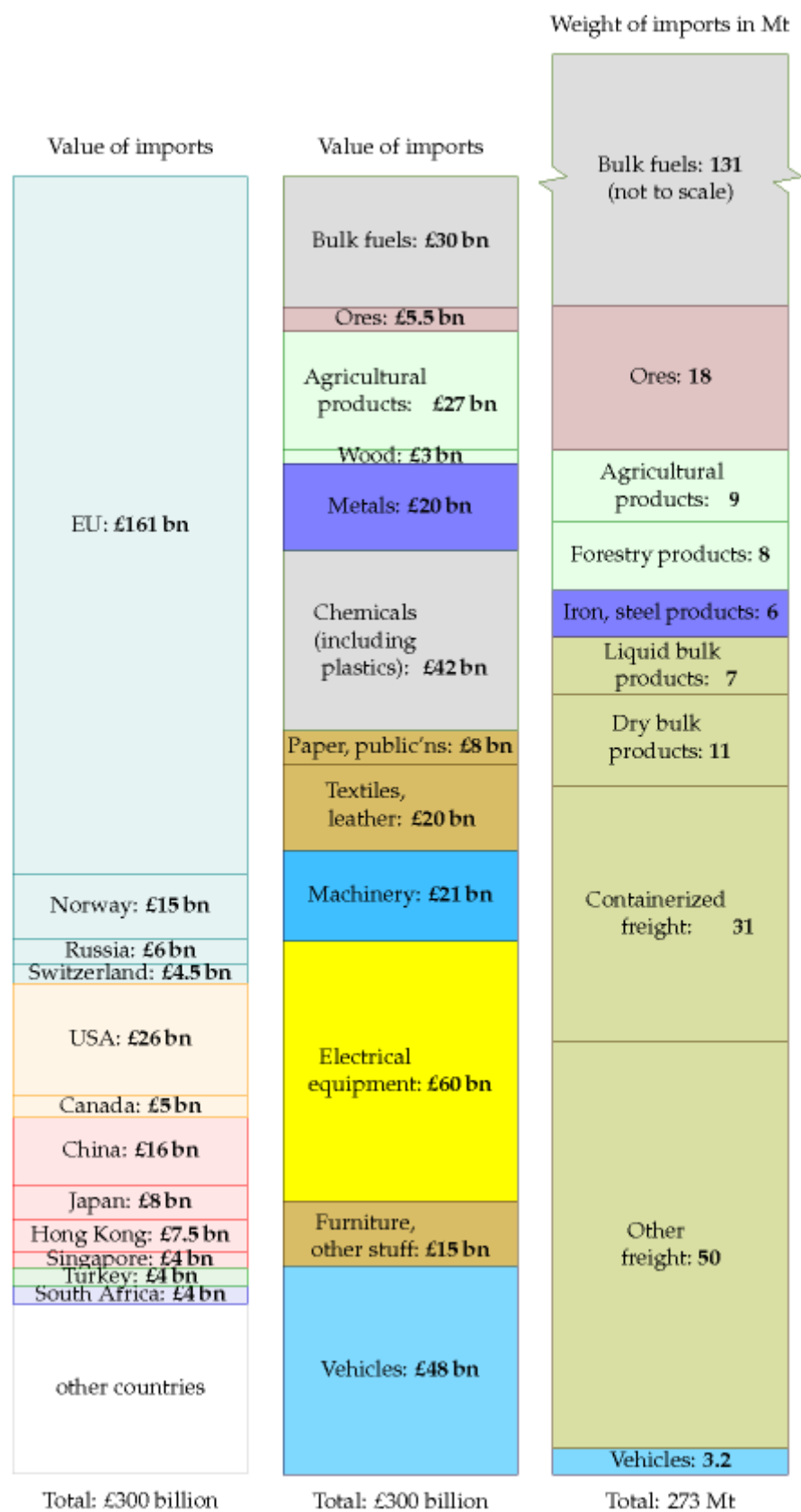


Fig.H.2: Invoer van goederen in Engeland, 2006

Zo kunnen we een ruwe schatting krijgen van de energie-voetafdruk van onze invoer, gewoon op basis van hun gewicht, als we zaken als erts of hout buiten beschouwing laten. Gezien de huidige onnauwkeurigheid van de gebruikte getallen, zullen we zeker uitglijden en onbedoeld dingen van hout of glas meerekenen, maar we mogen hopen dat een dergelijke uitglijder wordt gecompenseerd door een onderschatting van de grijze energie in de meeste metalen en plastic voorwerpen en in complexere goederen, die vaak dichterbij 30 kWh/kg of meer liggen in plaats van de veronderstelde 10 kWh/kg.

Voor de berekening neem ik uit de rechterkolom van **Fig.H.2** de ijzer- en staalprodukten, alsmede de droge bulk-, container- en andere vrachten, die 98 miljoen ton per jaar bedragen. Als ik daar naar schatting 25 miljoen ton levensmiddelen van aftrek, die waarschijnlijk grotendeels in de overige vracht verborgen zitten (de totale invoer van levensmiddelen bedroeg in 2006 34 miljoen ton), blijft er 73 miljoen ton over.



Fig.H.3: *Open mijnbouw van nioobium in Brazilië*

Als we deze 73 miljoen ton waarden tegen het hierboven vermelde tarief voor grijze energie en dat delen door 60 miljoen mensen, krijgen we 33 kWh/d per persoon.

[341] Voor auto's, moeten we minder uit de losse pols schatten omdat we meer weten: Het aantal ingevoerde auto's bedroeg in 2006 2,4 miljoen. Als we uitgaan van 76.000 kWh grijze energie (het cijfer van blz. [104]) per auto, dan draagt de invoer van auto's bij aan grijze energie ten belope van 8 kWh/d per persoon.

Ik heb de vloeibare bulk verwaarloosd omdat ik niet zeker weet welke producten bedoeld zijn. Als het grotendeels om vloeibare chemicaliën gaat, zou hun bijdrage aanzienlijk kunnen zijn.



Fig.H.7 : *Het viaduct van Millau in Frankrijk, de hoogste brug ter wereld. Staal en beton, 2,5 km lang en 353 m hoog.*

Alles bij elkaar hebben we 41 kWh/d per persoon aan grijze energie bij invoer - eigenlijk in de orde van grootte van de schatting van Dieter Helm en zijn collega's.

Ik vermoed dat de 41 kWh/d per persoon onderschat is omdat de veronderstelde energie-intensiteit (10 kWh/kg) te laag is voor de meeste basis-eindproducten zoals machines of elektrische apparaten. Zonder nu echter het exacte gewicht van alle in-

voercategorieën te kennen, is dit de best mogelijke schatting.

Levenscyclusanalyse voor gebouwen

In de **tabellen H.4** en **H.5** worden schattingen gegeven van de benodigde proces-energie voor bouw- en constructiematerialen. Zij omvatten ook de energie die nodig is voor het vervoer van de grondstoffen naar de fabriek, maar niet de energie die nodig is voor het vervoer van het eindproduct naar de bouwplaats.

Tabel H.6 gebruikt deze cijfers om een schatting te maken van de procesenergie voor het bouwen van een eengezinswoning. Het bruto energieverbruik trekt de lijn nog verder door en houdt ook rekening met de proportionele grijze energie van de gemeentelijke nutsinfrastructuur en bijvoorbeeld de grijze energie van de machines die nodig zijn voor de productie van de bouwmaterialen. Als vuistregel geldt dat het bruto energieverbruik ongeveer het dubbele is van het procesenergieverbruik [3kmcks].

Als we de 42.000 kWh verdelen over 100 jaar en dat verdubbelen om tot de bruto energiekosten te komen, geeft dit 2,3 kWh/d voor de totale grijze energie van een gebouw. Dit heeft alleen betrekking op het omhulsel van het gebouw - de bakstenen, dakpannen, dakbalken.



Grijze energie in bouwmaterialen

Materiaal	Grijs (MJ/kg)	Energie (kWh/kg)
Naaldhout, ovengedroogd, gezaagd	3,4	0,94
Loofhout, ovengedroogd, gezaagd	2,0	0,56
Hardhout, luchtgedroogd, gezaagd	0,5	0,14
Hardboard	24,2	6,7
Spaanplaat	8,0	2,2
MDF	11,3	3,1
Multiplex	10,4	2,9
Gelijmd hout	11	3,0
Gelamineerd fineerhout	11	3,0
Stro	0,24	0,07
Terracotta	0,7	0,19
Geperforeerd graniet, import	13,9	3,9
graniet, lokaal	5,9	1,6
Gipspleister	2,9	0,8
Gipsplaat	4,4	1,2
Vezelcement	4,8	1,3
Cement	5,6	1,6
Stortbeton	1,9	0,53
Prefab beton, stoomhardend	2,0	0,56
Prefab betonnen onderdelen, gegoten	1,9	0,53
Baksteen	2,5	0,69
Betonblok	1,5	0,42
Cellenbeton	3,6	1,0
Kunststoffen - algemeen	90	25
PVC	80	22
synthetisch rubber	110	30
Acrylverf	61,5	17
Glas	12,7	3,5
Glasvezel (glaswol)	28	7,8
Aluminium	170	47
Koper	100	28
gegalvaniseerd staal	38	10,6
roestvrij staal	51,5	14,3

Tabel H.4: *Grijze energie in bouwmaterialen (ervan uitgaande dat geen gerecycleerd materiaal wordt gebruikt). (Maatsteen is natuursteen of rotsblok dat in de juiste vorm en grootte is gehakt). Bronnen: [3kmcks], Lawson (1996).*

	Grijze energie (kWh/m ²)
Muren	
Houtskeletbouw, houten gevelbekleding, gipsplaat	52
Houten frame, klinkers, gipsplaat	156
Houten frame, aluminium buitenbekleding, gipsplaat	112
Metalen frame, klinkers, gipsplaat	168
Dubbele klinkermuur, gipsplaat	252
Cementgestabiliseerde bakstenen van klei	104
Vloeren	
Vloerplaat opbergvloer	81
110 mm betonnen plaat	179
200 mm Prevab betonplaat (T-balk, teruggeplaatst)	179
Daken	
Houten daksparren, betonnen dakpannen, bekleding met gipsplaten	70
Houten dakspanten, pannendak, gipsplaat bekleding	75
Houten dakspanten, golfplaat staal, gipsplaat bekleding	92

Tabel H.5: *Grijze energie in verschillende wand- vloer- en dakmaterialen.*
Bron: [3kmcks], Lawson (1996).

[343]

	Gebied (m ²)		Energiedichtheid (kWh/m ²)		Energie (kWh)
Vloeren	100	x	81	=	8.100
Dak	75	x	75	=	5.600
Buitenmuren	75	x	252	=	19.000
Binnenmuren	75	x	125	=	9.400
Totaal					42.000

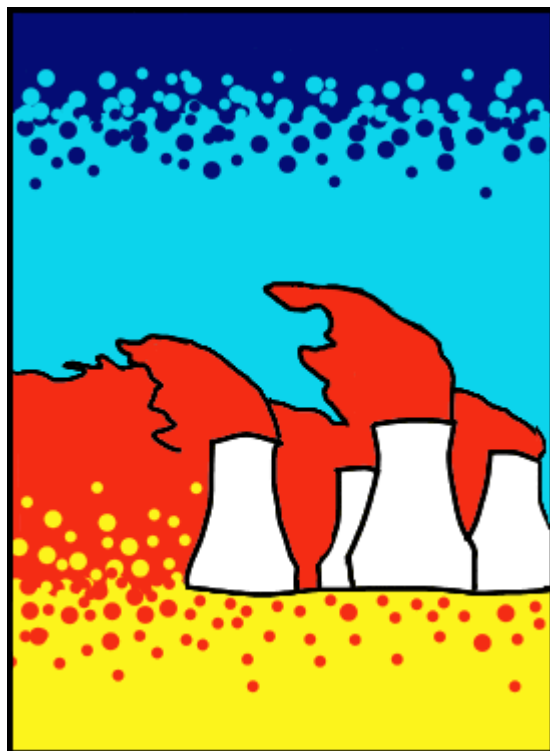
Tabel H.6 : *Procesenergie voor de productie van een eengezinswoning.*

[342] Opmerkingen en referenties

Pagina	
[339]	In een meer gedetailleerd vervolgonderzoek in opdracht van DEFRA – 322 wordt de belichaamde koolstof in de invoer geraamd op ongeveer 6,2 ton CO ₂ e per persoon. Wiedmann et al (2008).
	Verdere bronnen: www-greenbooklive.com over levenscyclusanalyses van bouwproducten. Enkele nuttige waarschuwingen over levenscyclusanalyse: www-gdrc.org/uem/lca/life-cycle.html .
	Aanvullende links: www-epa.gov/ord/NRMRL/lcaccess/resources.htm .

Deel IV: gegevens

Tabellen met nuttige gegevens



I gegevens

Bijlage I: Nuttige gegevens

SI-eenheden

De watt. Deze SI-eenheid is genoemd naar James Watt. Zoals voor alle SI-eenheden waarvan de naam is afgeleid van de eigenaam van een persoon, is de eerste letter van het symbool een hoofdletter (W). Maar wanneer een SI-eenheid wordt gespeld, moet deze altijd in kleine letters (watt) worden geschreven, met uitzondering van de "graad Celsius" $Q^{42.42}$
van wikipedia

SI staat voor *Système Internationale*. SI-eenheden moeten door alle ingenieurs worden gebruikt, zodat ze hun ruimteschepen niet verliezen.

Energie	een Joule	1 J	Naam	Kilo	Mega	Giga	Tera	Peta	Exa
Vermogen	een Watt	1 W	Symbool	k	M	G	T	P	E
Kracht	een Newton	1 N	Factor	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}
Lengte	een Meter	1 m							
Tijd	een Seconde	1 s	Naam	Centi	Milli	Mikro	Nano	Pico	Femto
Temperatuur	een Kelvin	1 K	Symbool	c	m	μ	n	p	f
			Factor	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}

Tabel.I.1 : SI-eenheden en voorvoegsels

Mijn voorkeurseenheden voor energie, vervoer en transport efficiëntie

energie	een Kilowattuur	1 kWh	3 600 000 J
arbeid	een Kilowattuur per dag	1 kWh/d	$(1000/24)W \approx 40W$
kracht	een Kilowattuur per 100 km	1 kWh/100 km	36N
tijd	een uur	1 h	3600 s
	een dag	1 d	$24 \times 3600 \text{ s} \approx 10^5 \text{ s}$
	een jaar	1 y	$365,25 \times 24 \times 3600 \text{ s} \approx \pi \times 10^7 \text{ s}$
kracht per gewicht	Kilowattuur per Ton-km	1 kWh/t-km	$3,6m/s^2 (\approx 0,37g)$

42) ^{Q42} Deze spellingconventie geldt alleen voor Engelstalige teksten! -

[346] Andere eenheden en symbolen

	Meeteenheid	Symbool	Waarde
Mensen	Persoon	p	
Massa	Ton	t	1 t = 1000 kg
	Gigatonne	Gt	1Gt = $10^9 \times 1000$ kg = 1 Pg
Vervoer	persoon-km	p-km	
Vervoer	ton-km t-km		
Volume	Liter	l	1 l = 0,001m ³
Oppervlakte	vierkante kilometer	qkm, km ²	1 qkm = 106m ²
	Hectare	ha	1 ha = 104m ²
	Wales		1 Wales = 21 000 km ²
	Londen (Groot-Londen)		1 Londen = 1580 km ²
Energie	Dinorwig		1 Dinorwig = 9 GWh

Miljard, miljoen en de voorvoegsels van andere auteurs

In Engelse teksten wordt een miljard vaak naar de Amerikaanse standaard "a billion" (1 bn) ^{Q4343} genoemd. Deze eenheid staat voor 1000 miljoen of 10^9 . Een triljoen daarentegen staat voor 1000 miljard of 10^{12} . Een (Europese) triljoen wordt volgens de Amerikaanse norm "a trillion" genoemd. Het standaard voorvoegsel voor miljard (10^9) is "giga-", voor triljoen (10^{12}) "tera-".

Miljoen en miljard worden op het Europese vasteland afgekort als mln. en bn.

In Engelssprekende landen wordt m vaak gebruikt als afkorting voor miljoen, maar dit is onverenigbaar met de SI-norm, waar m wordt gebruikt als voorvoegsel voor 1/1000ste (zoals in mg). In citaten waar m staat voor miljoen, vervang ik dit door M. Ik gebruik bijvoorbeeld Mtoe voor miljoen ton olie-equivalent en MtCO₂ voor miljoen ton CO₂.

Vervelende eenheden

Er zijn een heleboel veelgebruikte eenheden die om allerlei redenen vervelend zijn. Van sommige ben ik te weten gekomen wat ze betekenen. Ik stel dit samen zodat jullie de persberichten kunnen vertalen.

Huishoudens

De eenheid "huishoudens" wordt gewoonlijk gebruikt om de output van hernieuwbare energiebronnen te beschrijven. Voorbeeld: "De turbines van het 300 meter hoge Whitelee windmolenpark genereren 322 MW - genoeg om 200.000 huizen van stroom te voorzien." Huishouden wordt gedefinieerd als 4.700 kWh per jaar

43) ^{Q43} Dit kan ook voorkomen in de onvertaalde gedeelten (aanduidingen in de oorspronkelijke grafieken, aantekeningen aan het einde van de hoofdstukken) van deze vertaling. In de huidige tekst wordt de term "miljard" gebruikt voor 10^9 , en de term "biljoen" voor 10^{12} .

volgens de British Wind Energy Association [www-bwea.com/ukwed/operational.asp]. Dat is 0,54 kW of 13 kWh per dag. (Weinig organisaties gebruiken ook 4000 kWh/jaar per huishouden).

De eenheid "huishoudens" stoort mij omdat ik vrees dat sommige mensen het zullen verwarren met het totale vermogen dat door de mensen in een huishouden wordt verbruikt. Maar de laatste is ongeveer 24 keer zo groot. "Huishouden" houdt alleen rekening met de gemiddelde huishoudelijke elektriciteitsbehoefte van een huishouden. Er wordt geen rekening gehouden met de verwarmingsenergie die nodig is voor de begroting. [347] Niet de werkplek. Geen vervoer. Niet de energieslurpende openbare diensten die aan de leden van het huishouden worden verleend.

Als we het zouden hebben over de CO₂-uitstoot van een "huishouden", zou de officiële omrekeningsfactor hier 4 ton CO₂ per huishouden per jaar zijn.

Elektriciteitscentrales

Ideeën voor energiebesparing worden vaak geformuleerd in termen van "uitgespaarde elektriciteitscentrales". Volgens een reportage van de BBC bijvoorbeeld zouden nieuwe onverwoestbare LED's in verkeerslichten "een enorme hoeveelheid energie besparen - er zijn ongeveer twee middelgrote elektriciteitscentrales nodig om de verkeerslichten van het VK te laten branden".

news-bbc-co.uk/1/low/sci/tech/specials/sheffield_99/449368.stm

Wat is een middelgrote krachtcentrale? 10 MW? 50 MW? 100 MW? 500 MW? Ik heb geen idee. Een zoektocht op Google leerde dat sommigen denken dat het om 30 MW gaat, sommigen 250 MW, sommigen 500 MW (de meest voorkomende keuze), en sommigen 800 MW. Wat een zinloze eenheid!

Zou het voor het artikel over verkeerslichten niet verhelderder zijn om de besparing in procenten uit te drukken? "Voor de werking van de Engelse verkeerslichten is 11 MW elektriciteit nodig, of 0,03% van het nationale verbruik." Dat zou duidelijk maken hoe "enorm" de besparingen zouden zijn.

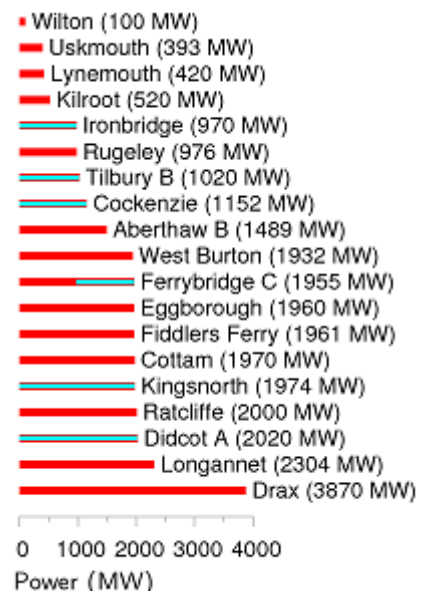


Fig.I.2: Output van kolengestookte elektriciteitscentrales in het VK. Blauw gemarkeerd zijn de 8 GW die in 2015 buiten bedrijf zullen worden gesteld. 2.500 MW verspreid over Engeland geeft 1 kWh/d per persoon

Auto's op de weg

In sommige aankondigingen wordt de CO₂-besparing omschreven als "het equivalent van auto's die van de weg verdwijnen". Richard Branson zei bijvoorbeeld dat als de Voyager-vloot van Virgin Trains zou overschakelen op 20% biodiesel - vindt u het trouwens niet overdreven om een trein een "groene trein op biodiesel" te noemen als hij voor 80% op fossiele brandstof rijdt en slechts voor 20% op groene brandstof? - Sorry, ik dwaal af. Richard Branson zei dat als de Voyager-vloot van Virgin Trains zou overschakelen op 20% biodiesel - ik leg de nadruk op "als" omdat mensen zoals hij altijd media-aandacht krijgen als ze aankondigen dat ze iets goeds van plan zijn, maar veel van deze luid aangekondigde initiatieven worden later stilletjes weer ingetrokken, zoals het idee om sleepwagens te gebruiken om vliegtuigen op luchthavens te verplaatsen om ze groener te maken - sorry, ik ratel weer door. Richard Branson zei dat als de Voyager-vloot van Virgin Trains zou overschakelen op 20% biodiesel, dit een vermindering van de CO₂-vervuiling zou betekenen van 34.500 ton per jaar, wat gelijk staat aan "23.000 auto's die van de weg verdwijnen". Deze verklaring geeft ons een aanwijzing over de omrekeningsfactor:

"één auto van de weg" ↔ -1,5 ton CO₂ per jaar.

[348] Calorieën

Calorieën zijn vervelend omdat in de dieetgemeenschap een kilocalorie (kcal) ook een "calorie" wordt genoemd. Eén zo'n voedsel-"calorie" (tussen aanhalingstekens) is dus gelijk aan 1000 (fysieke) calorieën (1000 cal = 1 kcal).

2.500 kcal = 3 kWh = 10.000 kJ = 10 MJ.

Vat (Barrel)

Een vervelende eenheid die geliefd is bij de oliegemeenschap is het Barrel, en ook de ton ruwe olie. Waarom kunnen ze het niet bij één eenheid houden? Een vat olie is 6,1 GJ of 1.700 kWh.

Barrels zijn dubbel zo vervelend omdat er verschillende definities zijn en elk vat een ander volume aangeeft.

Hier is een samenvatting van alles wat u moet weten over vaten: Een vat is 42 US gallons of 159 liter. Een vat olie is 0,1364 ton olie. Een vat ruwe olie heeft een energie van 5,75 GJ. Een vat olie weegt 136 kg. Een ton ruwe olie is 7,33 vaten en 42,1 GJ. De koolstofvervuiling van ruwe olie bedraagt 400 kg CO₂ per vat. www-chemlink.com.au/conversions.htm

Dit betekent dat bij een olieprijs van 100 dollar per vat, de energiekosten 6 dollar-cent per kWh bedragen. Indien de CO₂-belasting 250 dollar per ton CO₂ zou bedra-

gen, zou deze belasting de prijs per vat met 100 dollar doen stijgen.

Gallons

De gallon zou een mooie mensvriendelijke eenheid zijn als de Yankees hem niet hadden bezoedeld met een definitie die in tegenspraak is met die van alle anderen, net zoals hun definitie van de pint of de quart. De Amerikaanse volumematen zijn allemaal ongeveer 5/6 van de juiste maten. 1 US gal = 3,785 l = 0,83 imperial gal, 1 imperial gal = 4,545 l.

Ton

Tonnen zijn vervelend in Engelssprekende landen, want er is de "short ton", de "long ton" en de "metric ton". Deze definities liggen dicht genoeg bij elkaar dat ik ze hier niet hoeft te onderscheiden. 1 short ton (2.000 lb) = 907 kg, 1 long ton (2.240 lb) = 1.016 kg, 1 metrische ton (1 ton) = 1.000 kg.

BTU en "Quad"

British Thermal Units (BTU) zijn vervelend omdat zij geen deel uitmaken van het *Système Internationale* en ook geen praktische maat zijn. Net als de onpraktische joule zijn ze te klein, zodat je onzinnige voorvoegsels als ^{Q444} "quadrillion" (10¹⁵) moet gebruiken om ze in de praktijk te gebruiken.

1 kJ = 0,947 BTU, 1 kWh = 3.409 BTU.

Een "quad" is 1 quadriljoen BTU = 293 Twh.

[349]

Grappige eenheden

Kopjes thee

Is dit een goede manier om zonnepanelen in een goed daglicht te stellen? "Als alle 7.000 PV-modules ^{Q455} geplaatst zijn, zullen ze jaarlijks 180.000 eenheden groene stroom leveren - genoeg om 9 miljoen koppen thee te zetten". Deze mededeling staat gelijk aan een 1kW met 50 koppen thee.

De officiële volume-eenheid is een kopje: 1 US kopje (een halve US pint) van 0,24l; maar een kopje thee of koffie is meestal 0,18 l. Om 50 kopjes water van elk 0,18 l te verwarmen van 15 °C tot 100 °C is 1 kWh nodig.

Dus "negen miljoen koppen thee per jaar" is een andere manier om te zeggen "20 kW".

44) ^{Q44} Nogmaals, hier wordt de Amerikaanse term bedoeld. Het Amerikaanse "quadrillion" komt overeen met het Europese "quadrillion", zie ook de voetnoot op blz. [346].

45) ^{Q45} Dit zouden zeer kleine modules zijn met ongeveer 25 Wp per module.

Dubbeldekker bussen, Albert Halls, Wembley stadions...

"Als iedereen in Engeland waar het mogelijk was spouwmuurisolatie zou aanbrengen, zouden we maar liefst 7 miljoen ton kooldioxide-uitstoot kunnen voorkomen. Dat is genoeg koolstofdioxide om 40 miljoen dubbeldekkerbussen te vullen, of het nieuwe Wembley Stadium 900 keer!" Waaruit we het nuttige feit kunnen leren dat één Wembley 44.000 dubbeldekkerbussen is. In feite heeft de boiler van het Wembley Stadium een capaciteit van 1.140.000 kubieke meter.

"Als elk huishouden slechts één spaarlamp zou installeren, zou genoeg CO₂ worden bespaard om de Royal Albert Hall 1.980 keer te vullen!" (Een Albert Hall is 100.000 m³.)

Het uitdrukken van hoeveelheden CO₂ in volume in plaats van massa is een betrouwbare manier om ze groot te doen lijken. Als "1 kg CO₂ per dag" te weinig klinkt, zeg dan gewoon "200.000 liter CO₂ per jaar" !

Massa van CO ₂ ↔ Volume
2 kg CO ₂ ↔ 1m ³
1 kg CO ₂ ↔ 500 Liter
44 g CO ₂ ↔ 22 Liter
2 g CO ₂ ↔ 1 Liter

Tabel.I.3: Omrekening van volume naar massa

Hectare	= 10 ⁴ m ²
Acre	= 4050 m ²
Vierkante Mijl	= 2,6 km ²
Vierkante Foot	= 0,093 m ²
Vierkante Yard	= 0,84 m ²

Tabel.I.5: Oppervlakten

Nog meer volume

Een container is 2,4 m breed en 2,6 m hoog en (6,1 of 12,2) meter lang (hetgeen overeenkomt met de 20-voet containerafmeting TEU of de 40-voet containerafmeting FEU). Een TEU is de grootte van een kleine 20-voet container - een inwendig volume van ongeveer 33 m³. De meest voorkomende containers die je ziet zijn 40 voet met een volume van 2 TEU.



Fig.I.4: Een container van 20 voet (1 TEU)

- Een 40-voet container weegt 4 ton en kan 26 ton vracht vervoeren, het volume is 67,5 m³.
- Een zwembad heeft een volume van ongeveer 3000 m³.
- Een dubbeldekkerbus heeft een volume van 100 m³.
- Een heteluchtballon is 2500 m³.
- De Grote Piramide van Gizeh heeft een volume van 2.500.000 kubieke meter.

[350]

Oppervlakte

De oppervlakte van de aarde is $500 \times 10^6 \text{ km}^2$, de landoppervlakte is $150 \times 10^6 \text{ km}^2$. Mijn typisch Engels huis met drie slaapkamers heeft een woonoppervlakte van 88 m^2 . In de VS bedraagt de mediane grootte van een eengezinswoning 216 m^2 (2330 square-feet).

Vermogen

Als we het achtervoegsel (el) of (e) achter een vermogen schrijven, betekent dit dat we het expliciet over elektrisch vermogen hebben. Zo kan de output van een elektriciteitscentrale bijvoorbeeld $1 \text{ GW}(\text{el})$ bedragen, terwijl zij $2,56 \text{ GW}$ aan chemische energie verbruikt. Evenzo geeft het achtervoegsel (th) aan een hoeveelheid vermogen aan dat het om thermisch vermogen gaat. Hetzelfde geldt voor achtervoegsels bij energiehoeveelheden. "Mijn huis verbruikt $2 \text{ kWh}(\text{el})$ elektriciteit per dag."

Als we het achtervoegsel p of (piek) achter een vermogensgrootte zetten, betekent dat piekvermogen of piekcapaciteit. Zo kan bijvoorbeeld 10 m^2 aan PV-modules een capaciteit hebben van 1 kWp .

- $1 \text{ kWh/d} = 24 \text{ kW}$.
- $1 \text{ toe/j} = 1,33 \text{ kW}$.
- Olie komt met ongeveer een halve liter per seconde uit een voedingspomp. Dat is 5 kWh per seconde of 18 MW .
- Het vermogen van een Formule 1-racewagen bedraagt 560 kW .
- Het Engelse elektriciteitsverbruik bedraagt 17 kWh per dag per persoon, of $42,5 \text{ GW}$ voor heel Engeland.
- "Een ton" airconditioning in een kamer is $3,5 \text{ kW}$.

Wereldenergieverbruik

Het wereldenergieverbruik is gelijk aan 15 TW , en het elektriciteitsverbruik is gelijk aan 2 TW .

Nuttige omrekeningsfactoren

- Om TWh per jaar om te zetten in GW , deelt u door 9.
 1 kWh/d per persoon is hetzelfde als $2,5 \text{ GW}$ voor heel Engeland, of 22 TWh/j voor heel Engeland.
- Om mpg (miles per British gallon) om te rekenen naar km per liter, deel je door 3.
- Bij kamertemperatuur, $1 \text{ kT} = 40 \text{ eV}$.
- Bij kamertemperatuur is 1 kT per molecuul = $2,5 \text{ kJ/mol}$.

Meterstanden

Hoe de gasmeterstanden omzetten in kilowattuur:

- Als uw gasmeter is gekalibreerd in kubieke voet, neemt u de honderdtallen en vermenigvuldigt u die met 32,32 om kWh te krijgen.
- Als uw gasmeter is gekalibreerd in kubieke voet, vermenigvuldigt u de aflezing met 11,42 om kWh te krijgen.

[351]

Calorische waarden van brandstoffen

- Ruwe olie: 37 MJ/l; 10,3 kWh/l.
- Aardgas: 38 MJ/m³. (Methaan heeft een dichtheid van 1,819 kg/m³.)
- 1 ton steenkool: 29,3 GJ; 8000 kWh.
- Fusie-energie van gewoon water: 1800 kWh per liter.
- Zie ook **tabel 26.14** op blz. [218] en **tabel D.3** op blz. [304].

Warmtecapaciteiten

- De warmtecapaciteit van lucht is 1 kJ/kg/°C of 29 J/mol/°C.
- De dichtheid van lucht is 1,2 kg/m³.
- De warmtecapaciteit per volume-eenheid is dus 1,2 kJ/m³/°C.
- De latente verdampingswarmte van water: 2257,92 kJ/kg.
- Warmtecapaciteit van waterdamp: 1,87 kJ/kg/°C.
- De warmtecapaciteit van water is 4,2 kJ/l/°C.
- De dichtheid van stoom is 0,590 kg/m³.

Druk

- Atmosferische druk: 1 bar $\approx$ 105 Pa (Pascal).
- Druk op 1000 m waterdiepte: 100 bar.
- Op 3000 m waterdiepte: 300 bar.

Geld

Ik heb de discussies over geld gebaseerd op de volgende omrekeningskoersen: 1 € = \$1,26, 1 £ = \$1,85, \$1 = \$1,12 Canadees. Dit waren de correcte wisselkoersen medio 2006.

Broeikasgasconversiefactoren – gCO₂ per kWh

Frankrijk	83
Zweden	87
Canada	220
Oostenrijk	250
België	335
Europese Unie	353
Finland	399
Spanje	408
Japan	483
Portugal	525
Verenigd Koninkrijk	580
Luxemburg	590
Duitsland	601
USA	613
<u>Nederland</u>	652
Italië	667
Ierland	784
Griekenland	864
Denemarken	881

Fig.I.9: *Koolstofintensiteit van de elektriciteitsproductie (gCO₂ per kWh elektriciteit)*

Broeikasgasconversiefactoren – gCO₂ per kWh brandstof

Brandstof	emissies (gCO₂ per kWh van chemische energie)
Aardgas	190
Raffinaderijgas	200
Ethaan	200
LPG	210
Kerosine	240
Benzine	240
Diesel	250
Zware stookolie	260
Ruwe benzine	260
Coke	300
Steenkool	300
Petroleumcokes	340

Fig.I.10: *Emissies door brandstofverbranding. Bron: Richtsnoeren van DEFRA inzake milieurapportage voor rapportage door bedrijven over de uitstoot van broeikasgassen.*

Broeikasgasemissies per hoofd van de bevolking / BNP

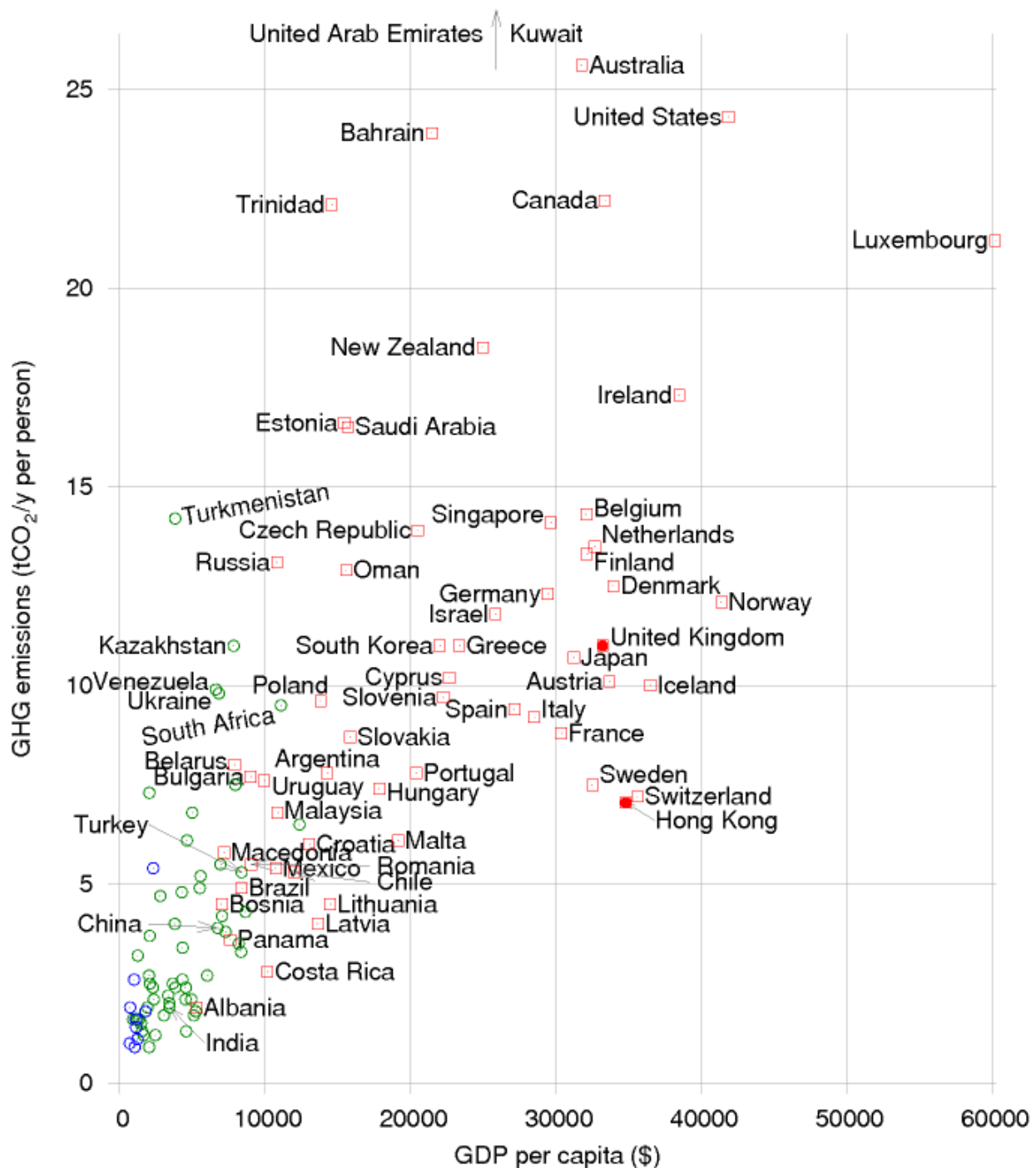


Fig.I.11: Broeikasgasemissies per hoofd van de bevolking vs. BNP per hoofd van de bevolking, in koopkrachtequivalent US-dollar. Vierkanten geven "hoogontwikkelde" landen aan, cirkels "middelmatige" of "lage". Zie ook Fig.30.1 (blz. [250]) en Fig.18.4 (blz. [121]). Bron: UNDP Human Development Report, 2007.[3av4s9]

Broeikasgasemissies per hoofd van de bevolking / kWh/d



Fig.I.12: Broeikasgasemissies per hoofd van de bevolking vs. energieverbruik per hoofd van de bevolking. De lijnen geven de emissie-intensiteit van steenkool en aardgas weer. Vierkanten geven "hoogontwikkelde" landen aan, cirkels "middelmatige" of "lage". Zie ook **Fig.30.1** (blz. [250]) en **Fig.18.4** (blz. [121]). Bron: UNDP Human Development Report, 2007.

J: Bevolkingsdichtheid

In **Fig.J.1** is de oppervlakte van de verschillende regio's uitgezet tegen de bevolking. Diagonalen in het diagram zijn lijnen van gelijke bevolkingsdichtheid. Bangladesh, op de tweede rij van rechts, heeft een bevolkingsdichtheid van 1000 per km^2 ; India, Engeland, Nederland en Japan hebben ongeveer een derde daarvan: 350 per km^2 . Veel Europese landen hebben er ongeveer 100 per km^2 . Aan het andere uiterste bevinden zich Canada, Australië en Libië, met bevolkingsdichtheden van ongeveer 3 mensen per km^2 . De middelste diagonaal geeft de bevolkingsdichtheid van de aarde aan: 43 mensen per km^2 . Vanuit dit perspectief is Amerika een gemiddeld land: de 48 kernstaten van de VS hebben dezelfde bevolkingsdichtheid als de aarde. Regio's met bijzonder grote oppervlakten en bevolkingsdichtheden onder het wereldgemiddelde zijn Rusland, Canada, Latijns-Amerika, Soedan, Algerije en Saoedi-Arabië. Van deze grote staten met een groot grondgebied liggen de volgende dicht bij Engeland, zodat Engeland bijzonder vriendelijk tegen hen zou moeten zijn: Kazachstan, Libië, Saudi-Arabië, Algerije en Soedan.

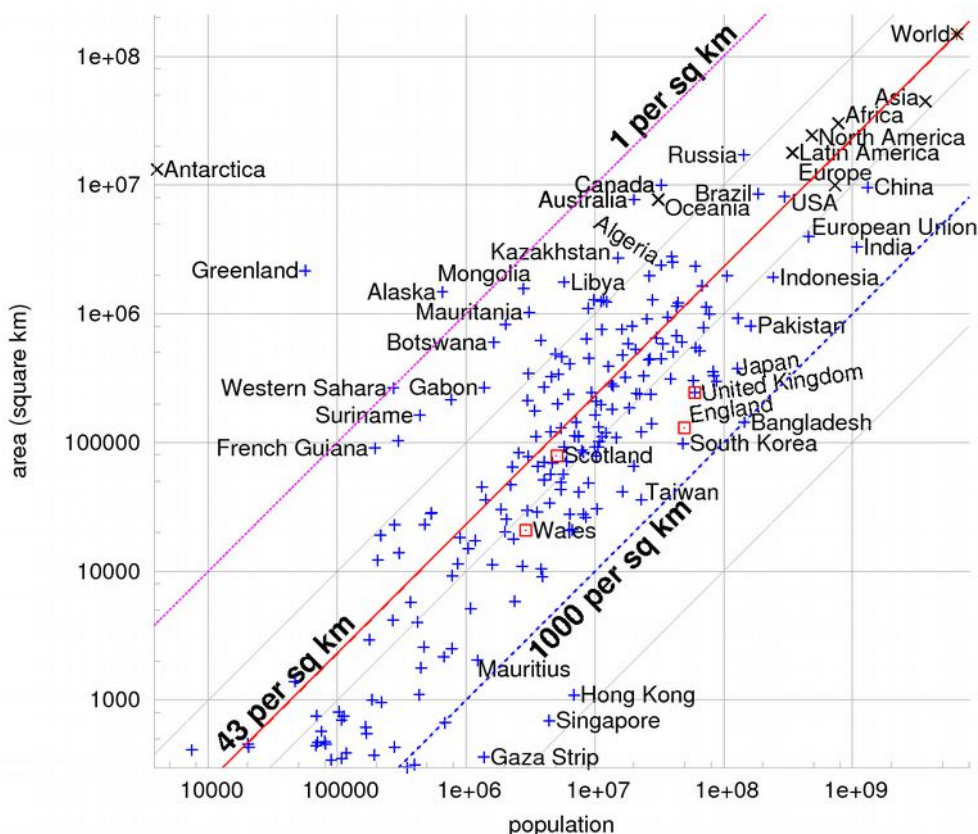


Fig.J.1: Bevolking en oppervlakte van landen en regio's in de wereld. Beide schalen zijn logaritmisch. Elke lijn geeft een specifieke bevolkingsdichtheid aan; landen met de hoogste bevolkingsdichtheid staan rechtsonder; landen met een lagere bevolkingsdichtheid linksboven. Deze gegevens zijn beschikbaar in tabelvorm onderaan blz. [356].

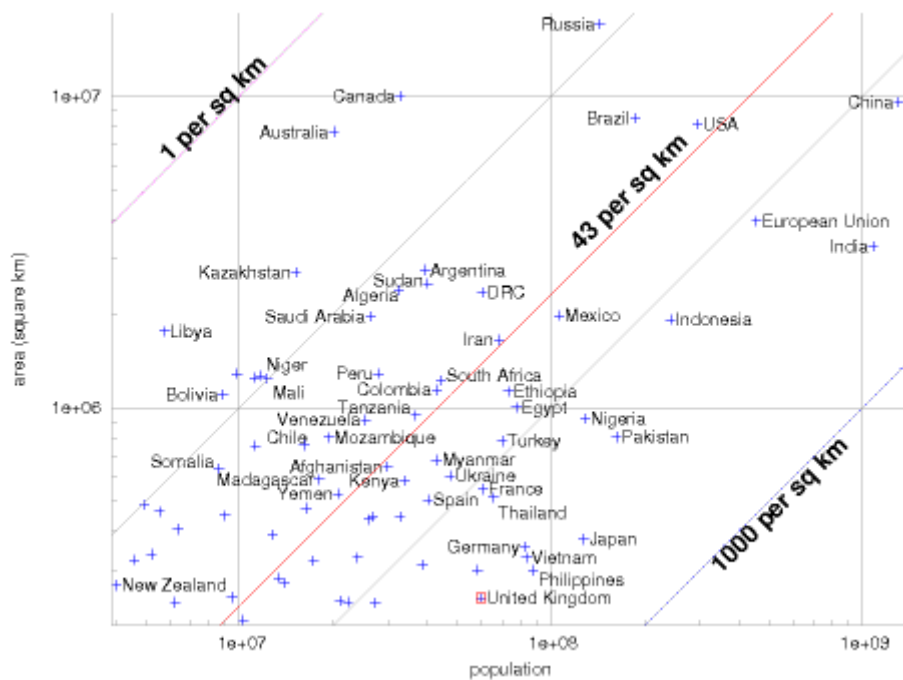


Fig.J.2: Bevolking en oppervlakte van landen en regio's in de wereld. Beide schalen zijn logaritmisch. Elke lijn geeft een specifieke bevolkingsdichtheid aan; deze grafiek toont een gedeelte van **Fig.J.1**. Deze gegevens zijn beschikbaar in tabelvorm onderaan blz. [356].

Regio	Bevolking	Landoppervlak (km ²)	Inwoners per km ²	Oppervl per EW (m ²)
Wereld	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Azië	3 670 000 000	44 500 000	82	12 100
Afrika	778 000 000	30 000 000	26	38 600
Europa	732 000 000	9 930 000	74	13 500
Noord-Amerika	483 000 000	24 200 000	20	50 200
Latijns-Amerika	342 000 000	17 800 000	19	52 100
Oceanië	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Antarctica	4 000	13 200 000		

Tabel.J.3: Bevolkingsdichtheid van de continenten. De gegevens zijn grafisch weergegeven in Fig.J.1 en Fig.J.2. Gegevens van 2005

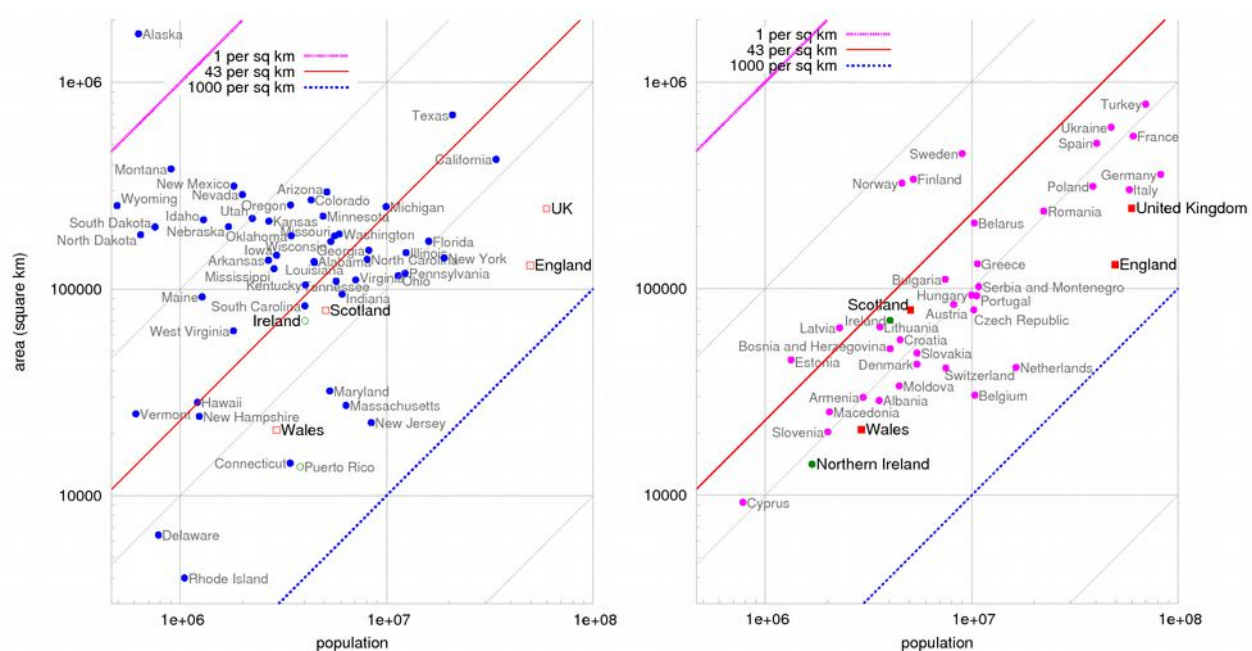


Fig.J.4: Bevolking en oppervlakte van Amerikaanse staten en van regio's in en rond Europa.

[354]

Tabel J Bevolkingsdichtheid

Regio	Bevolking	Oppervlakte (km2)	Personen per km2	Gebied per persoon (m2)
Afghanistan	29 900 000	647 000	46	21 600
Afrika	778 000 000	30 000 000	26	38 600
Alaska	655 000	1 480 000	0,44	2 260 000
Albanië	3 560 000	28 700	123	8 060
Algerije	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Angola	11 100 000	1 240 000	9	111 000
Antarctica	4 000	13 200 000	.	.
Argentinië	39 500 000	2 760 000	14	69 900
Azië	3 670 000 000	44 500 000	82	12 100
Australië	20 000 000	7 680 000	2.6	382 000
Bangladesh	144 000 000	144 000	1 000	997
Wit-Rusland	10 300 000	207 000	50	20 100
België	10 000 000	31 000	340	2 945
Bolivia	8 850 000	1 090 000	8	124 000
Bosnië & Herzegovina	4 020 000	51 100	79	12 700
Botswana	1 640 000	600 000	2.7	366 000

Brazilië	186 000 000	8 510 000	22	45 700
Bulgarije	7 450 000	110 000	67	14 800
CAR	3 790 000	622 000	6	163 000
Canada	32 800 000	9 980 000	3.3	304 000
Tsjaad	9 820 000	1 280 000	8	130 000
Chili	16 100 000	756 000	21	46 900
China	1 300 000 000	9 590 000	136	7 340
Colombia	42 900 000	1 130 000	38	26 500
Kroatië	4 490 000	56 500	80	12 500
Tsjechische Republiek	10 200 000	78 800	129	7 700
DR Congo	60 000 000	2 340 000	26	39 000
Denemarken	5 430 000	43 000	126	7 930
Duitsland	82 400 000	357 000	230	4 330
Egypte	77 500 000	1 000 000	77	12 900
Engeland	49 600 000	130 000	380	2 630
Estland	1 330 000	45 200	29	33 900
Ethiopië	73 000 000	1 120 000	65	15 400
Europa	732 000 000	9 930 000	74	13 500
Europese Unie	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Filipijnen	87 800 000	300 000	292	3 410
Finland	5 220 000	338 000	15	64 700
Frankrijk	60 600 000	547 000	110	9 010
Gazastrook	1 370 000	360	3 820	261
Griekenland	10 600 000	131 000	81	12 300
Groenland	56 300	2 160 000	0.026	38 400 000
Hongkong	6 890 000	1 090	6 310	158
Hongarije	10 000 000	93 000	107	9 290
IJsland	296 000	103 000	2.9	347 000
India	1 080 000 000	3 280 000	328	3 040
Indonesië	241 000 000	1 910 000	126	7 930
Iran	68 000 000	1 640 000	41	24 200
Ierland	4 010 000	70 200	57	17 500
Italië	58 100 000	301 000	192	5 180
Japan	127 000 000	377 000	337	2 960
Jemen	20 700 000	527 000	39	25 400
Kazachstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Kenia	33 800 000	582 000	58	17 200
Latijns-Amerika	342 000 000	17 800 000	19	52 100
Letland	2 290 000	64 500	35	28 200
Libië	5 760 000	1 750 000	3.3	305 000
Litouwen	3 590 000	65 200	55	18 100

Madagaskar	18 000 000	587 000	31	32 500
Mali	12 200 000	1 240 000	10	100 000
Malta	398 000	316	1 260	792
Mauritanië	3 080 000	1 030 000	3	333 000
Mexico	106 000 000	1 970 000	54	18 500
Moldavië	4 450 000	33 800	131	7 590
Mongolië	2 790 000	1 560 000	1.8	560 000
Mozambique	19 400 000	801 000	24	41 300
Myanmar	42 900 000	678 000	63	15 800
Namibië	2 030 000	825 000	2.5	406 000
Nederland	16 400 000	41 500	395	2 530
Nieuw-Zeeland	4 030 000	268 000	15	66 500
Niger [357]	600 000	1 260 000	9	108 000
Nigeria	128 000 000	923 000	139	7 170
Noord-Amerika	483 000 000	24 200 000	20	50 200
Noorwegen	4 593 000	324 000	14	71 000
Oceanië	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Oekraïne	47 400 000	603 000	78	12 700
Oostenrijk	8 180 000	83 800	98	10 200
Pakistan	162 000 000	803 000	202	4 940
Peru	27 900 000	1 280 000	22	46 000
Polen	39 000 000	313 000	124	8 000
Portugal	10 500 000	92 300	114	8 740
Republiek Macedonië	2 040 000	25 300	81	12 300
Roemenië	22 300 000	237 000	94	10 600
Rusland	143 000 000	17 000 000	8	119 000
Saudi-Arabië	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Schotland	5 050 000	78 700	64	15 500
Servië & Montenegro	10 800 000	102 000	105	9 450
Singapore	4 420 000	693	6 380	156
Slowakije	5 430 000	48 800	111	8 990
Slovenië	2 010 000	20 200	99	10 000
Soedan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Somalië	8 590 000	637 000	13	74 200
Spanje	40 300 000	504 000	80	12 500
Suriname	438 000	163 000	2.7	372 000
Taiwan	22 800 000	35 900	636	1 570
Tanzania	36 700 000	945 000	39	25 700
Thailand	65 400 000	514 000	127	7 850
Turkije	69 600 000	780 000	89	11 200
Venezuela	25 300 000	912 000	28	35 900

Verenigd Koninkrijk	59 500 000	244 000	243	4 110
Vietnam	83 500 000	329 000	253	3 940
VS (ex. Alaska)	295 000 000	8 150 000	36	27 600
Wales	2 910 000	20 700	140	7 110
Westelijke Sahara	273 000	266 000	1	974 000
Wereld	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Zambia	11 200 000	752 000	15	66 800
Zuid-Afrika	44 300 000	1 210 000	36	27 500
Zuid-Korea	48 400 000	98 400	491	2 030
Zweden	9 000 000	449 000	20	49 900
Zwitserland	7 480 000	41 200	181	5 510

Tabel J.5 *Regio's en hun bevolkingsdichtheid. Bevolkingsaantallen van meer dan 50 miljoen mensen en gebieden van meer dan 5 miljoen km² zijn gemarkeerd. Deze gegevens zijn grafisch weergegeven in **Fig.J.1** (blz. [354]). Gegevens van 2005.*

De energiegeshiedenis van Engeland

Primaire brandstof	kWh/d/p	kWh(el)/d/p
Olie	43	
Aardgas	47	
Steenkool	20	
Kernenergie	9 →	3,4
Waterkracht		0,2
Andere duurzame energiebronnen		0,8

Tabel K.1: Uitsplitsing van primaire energiebronnen in het VK (2004-2006)

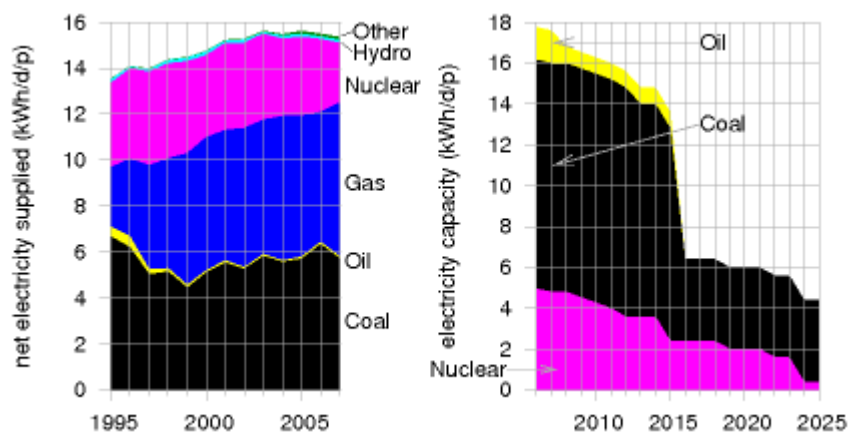


Fig.K.2: Links: Netto-elektriciteitsproductie van Engeland, per bron, in kWh per dag per persoon. (Nog eens 0,9 kWh/d/p wordt opgewekt en verbruikt door de opwekkingsinstallaties zelf).

Rechts: Het energietekort als gevolg van de sluiting van elektrici-

teitscentrales in Engeland, volgens prognoses van het nutsbedrijf EdF. Deze grafiek toont de capaciteit van kerncentrales, kolencentrales en oliecentrales, in kWh per dag per persoon. Capaciteit is de maximale output die een bron kan genereren.

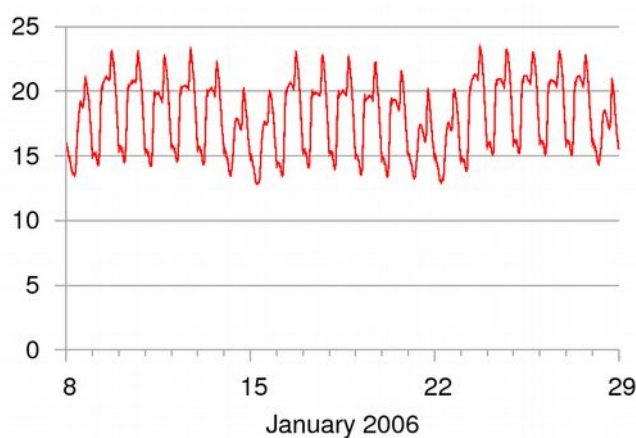


Fig.K.3: Elektriciteitsvraag in het VK (in kWh/d per persoon) gedurende twee winterweken in 2006. De pieken liggen elke dag om 18.00 uur. (Als u geïnteresseerd bent in de nationale vraag: De bovengrens van het plaatje, 24 kWh/d per persoon, komt overeen met 60 GW voor heel Engeland).

	2006	2007
"primaire eenheden" (de eerste 2 kWh/d)	10,73 p/kWh	17,43 p/kWh
"secundaire eenheden" (de rest)	8,13 p/kWh	9,70 p/kWh

Tabel K.4: Residentiële elektriciteitsprijzen (2006, 2007) voor Powergen-kanten in Cambridge, inclusief belastingen.

[359]

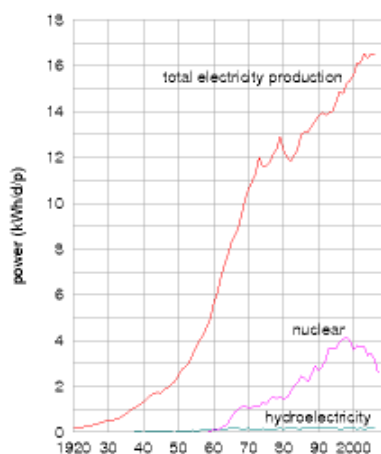


Fig.K.5: historische ontwikkeling van de Engelse elektriciteitsproductie, waterkracht en kernenergie afzonderlijk. Output per persoon uitgaande van 60 miljoen PE.

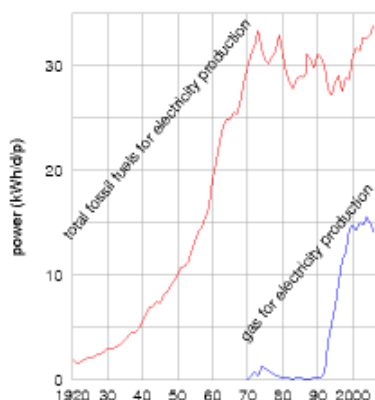


Fig.K.6: Historische ontwikkeling van het Engelse gebruik van fossiele brandstoffen voor de opwekking van elektriciteit. Output per persoon uitgaande van 60 miljoen i.e..

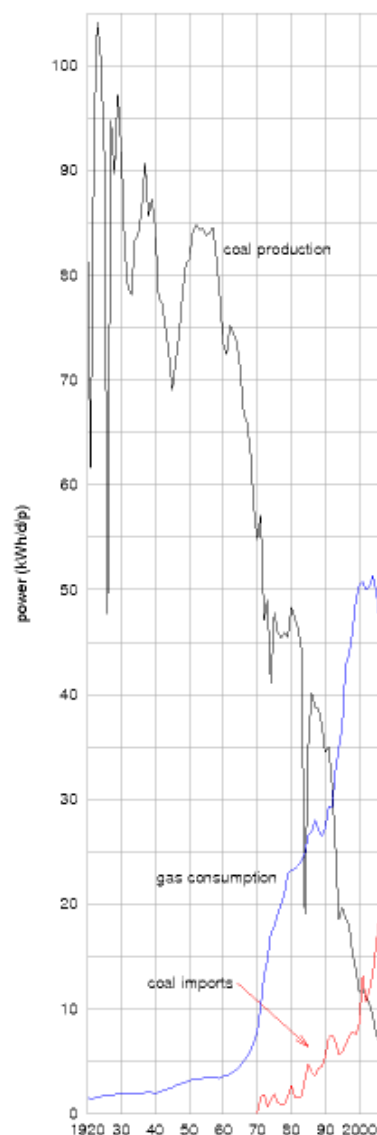
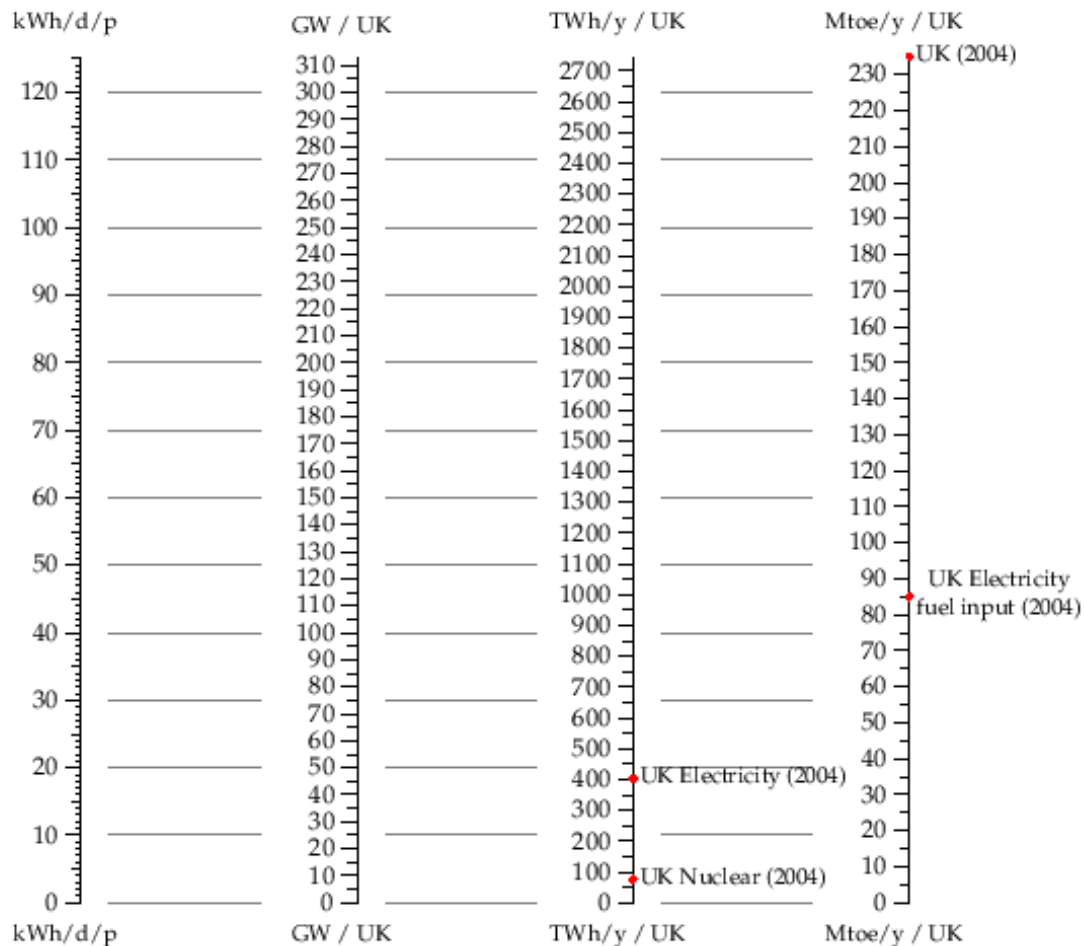


Fig.K.7: (Rechts) Engelse steenkoolproductie en -invoer, Engels gasverbruik. Output per persoon uitgaande van 60 miljoen PE.

Omzettabellen



1 kWh/d the same as $\frac{1}{24}$ kW

GW often used for 'capacity' (peak output)

TWh/y often used for average output

1 Mtoe 'one million tons of oil equivalent'

"UK" = 60 million people

USA energy consumption: 250 kWh/d per person

Europe energy consumption: 125 kWh/d per person

The most commonly used units in public documents discussing power options are:

terawatt-hours per year (TWh/y).

1000 TWh/y per United Kingdom is roughly equal to 45 kWh/d per person.

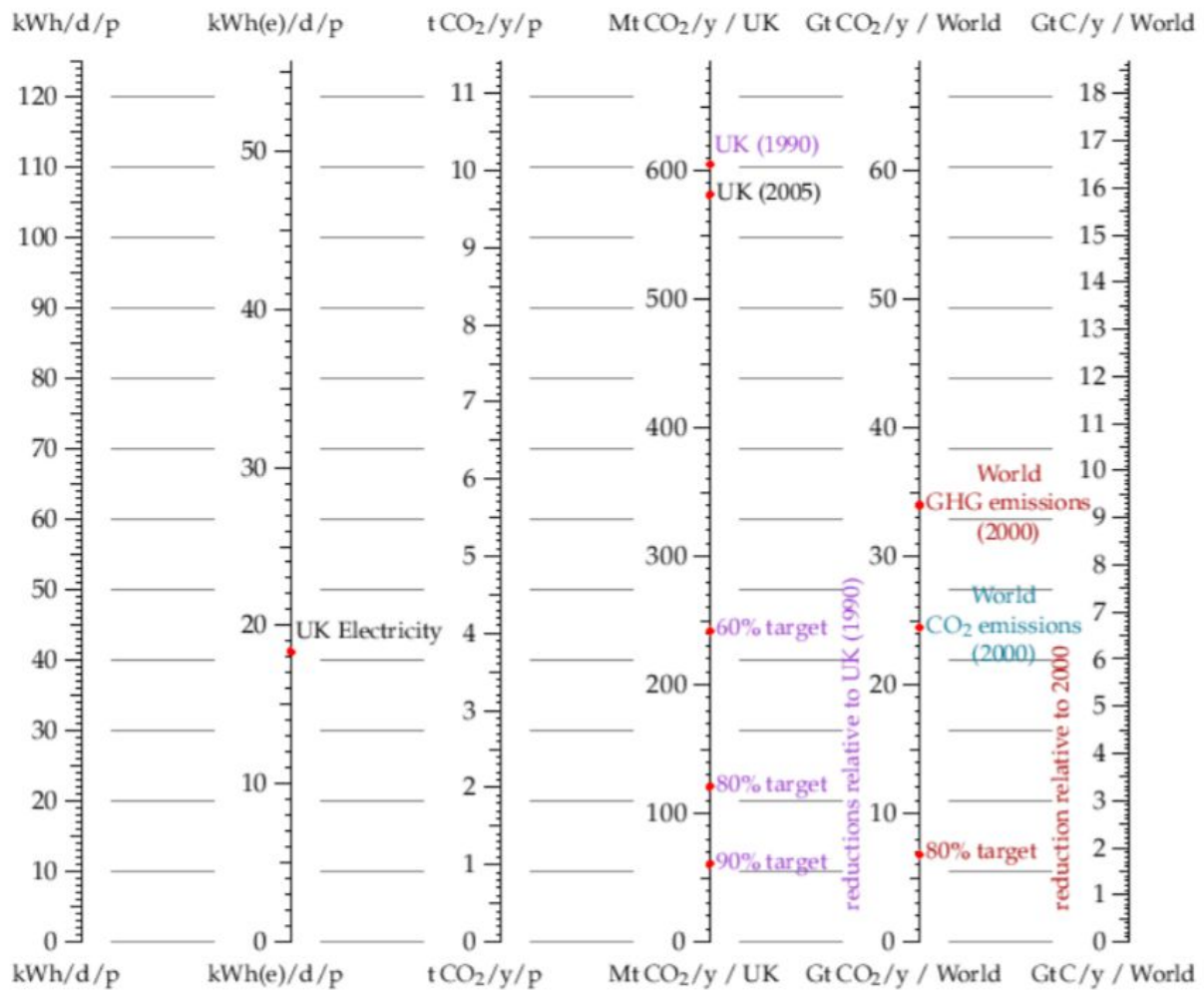
gigawatts (GW).

2.5 GW per UK is 1 kWh/d per person.

million tons of oil equivalent per year (Mtoe/y).

2 Mtoe/y per UK is roughly 1 kWh/d per person.

Carbon translation chart



kWh *chemical* energy exchange rate:
 1 kWh ↔ 250 g of CO₂ (oil, petrol)
 (for gas, 1 kWh ↔ 200 g)
 kWh(e) *electrical* energy is more costly:
 1 kWh(e) ↔ 445 g of CO₂ (gas)
 (Coal costs twice as much CO₂)
 tCO₂ ton of CO₂
 MtC million tons of carbon

"UK" = 60 million people
 "World" = 6 billion people

[360]

Lijst van weblinks

Hierin zijn de expliciete links voor de overeenkomstige "tinyURLs" die in de tekst worden vermeld geplaatst.

In deze Nederlandse versie niet geplaatst.

Wel te vinden op www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/book/tex/cft.url.html)

[363]

Literatuuroverzicht

In deze Nederlandse versie niet geplaatst.

Wel te vinden op www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/book/tex/cft.url.html)

Over de auteur David JC MacKay

Duurzame energie - zonder gebakken lucht

David MacKay is hoogleraar aan het Departement Natuurkunde van de Universiteit van Cambridge.

Hij studeerde Natuurwetenschappen aan Cambridge en promoveerde vervolgens in Computation en neurale systemen aan het California Institute of Technology. Hij keerde terug naar Cambridge als onderzoeker aan het Darwin College van de Royal Society. Hij is internationaal bekend om zijn onderzoek op het gebied van machinaal leren, informatietheorie en communicatiesystemen, waaronder de uitvinding van Dasher, een software-interface die efficiënte communicatie mogelijk maakt in elke taal met elke spier. Sinds 1995 doceert hij natuurkunde in Cambridge. Sinds 2005, heeft hij een groot deel van zijn tijd gewijd aan openbaar onderwijs over energie. Hij is lid van de World Economic Forum Global Agenda Council on Climate Change.



De autor. juli 2008 (foto: David Stern)

Biografie via zijn uitgever (<https://www.uit.co.uk/energy-subject/sustainable-energy>)

Bibliografie

Over de auteur

David MacKay was hoogleraar aan het Departement Natuurkunde van de Universiteit van Cambridge, een Fellow of the Royal Society (FRS) en Regius Professor of Engineering aan de Universiteit van Cambridge.



Hij studeerde Natuurwetenschappen in Cambridge en promoveerde vervolgens in Computation and Neural Systems aan Caltech - het California Institute of Technology. Hij keerde terug naar Cambridge als onderzoeker aan het Darwin College van de Royal Society. Hij is internationaal bekend om zijn onderzoek op het gebied van machinaal leren, informatietheorie en communicatiesystemen, waaronder de uitvinding van Dasher, een software-interface die efficiënte communicatie in elke taal met elke spier mogelijk maakt. Hij doceerde natuurkunde in Cambridge en wijdde een groot deel van zijn tijd aan openbaar onderwijs over energie. Hij was lid van de Global Agenda Council on Climate Change van het World Economic Forum.

Van 2009 tot 2014 was hij wetenschappelijk hoofdadviseur van het Britse ministerie van Energie en Klimaatverandering ("DECC") en in de New Year's Honours List van 2016 werd hem een ridderorde toegekend voor diensten aan wetenschappelijk advies in de regering en Science Outreach.

Hij overleed in 2016 op 48-jarige leeftijd.

